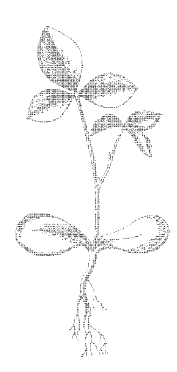

Л. П. Крайзмер
БИОНИКА
К
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 453

Л. П. КРАЙЗМЕР

БИОНИКА





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1962 ЛЕНИНГРАД

Книга посвящена изложению основных вопросов бионики как научного направления, в котором рассматриваются возможности использования знания биологических процессов и методов для решения инженерных задач. Основное внимание в книге уделяется вопросам, связанным с процессами восприятия, хранения, передачи и переработки информации в живых организмах и возможностям использования этих знаний при разработке технических кибернетических систем для повышения их универсальности, гибкости и надежности.

Книга рассчитана на читателя, знакомого с основами радиоэлектроники и технической кибернетики.

6П2.15 *Крайзмер Леонид Павлович*
К 77 **Бионика.** М.—Л., Госэнергоиздат, 1962. 72 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 453).

6П2.15

Редактор *Ю. Н. Пленкин* Техн. редактор *Н. А. Бульдяев*
Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 26/IV 1962 г. Подписано к печати 3/IX 1962 г.
Т 09763 Бумага 84×108¹/₃₂ 3,69 п. л. Уч.-изд. л. 4,0
Тираж 65 000 экз. Цена 16 коп. Заказ 2286

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10

СОДЕРЖАНИЕ

«...Получат широкое применение кибернетика, электронные счетно-решающие и управляющие устройства в производственных процессах промышленности, строительной индустрии и транспорта, в научных исследованиях, в плановых и проектно-конструкторских расчетах, в сфере учета и управления».

(Из Программы Коммунистической партии Советского Союза)

ВВЕДЕНИЕ

Кибернетика как самостоятельное научное направление возникла в послевоенные годы. Истекшее десятилетие характеризуется бурным развитием кибернетики, которое выражается, с одной стороны, в углублении ее теоретических основ, а с другой — во все более широком использовании достижений кибернетики во всех областях науки, техники и промышленности.

Материальной базой развития теории и успехов использования достижений кибернетики явилось быстрое развитие кибернетической техники и в первую очередь быстродействующих электронных вычислительных машин дискретного действия.

В конце второй мировой войны в Филадельфийской технической школе была разработана машина ЭНИАК, предназначенная для расчетов в области баллистики. В процессе эксплуатации машины вскоре стало ясно, что ее можно использовать и для решения широкого класса других задач, например для решения дифференциальных уравнений в частных производных. Принципиально современные электронные цифровые машины позволяют автоматизировать любой вид человеческой умственной деятельности, если только он может быть описан в форме алгоритма, т. е. системы правил, четко

и однозначно определяющих процесс выполнения данного вида умственного задания.

Одно из наиболее поразительных свойств цифровых вычислительных машин заключается в их универсальности, обусловленной, во-первых, возможностью сведе́ния сложных математических задач к определенной последовательности простейших арифметических операций и, во-вторых, возможностью описания математическими выражениями разнообразных процессов мыслительной деятельности человека.

Указанные возможности и являются основой того, что одна и та же вычислительная машина, выполняя только сложение чисел, принципиально оказывается пригодной для решения сложнейших математических задач вычислительного характера, управления любыми производственными и транспортными процессами, выдачи справок и автоматического перевода с одного языка на другой, планирования и статистических расчетов, диагностики заболеваний и игры в шахматы, сочинения формально грамотных, хотя и лишенных эмоциональной окраски, музыкальных или поэтических произведений и многих других функций, которые могли выполняться только человеком.

Важно подчеркнуть при этом, что для перехода к новой области своей «деятельности» машина принципиально не требует ни переделок, ни изменения структуры или схемы, ни даже новой регулировки. Просто в нее нужно ввести новую программу, в которой и воплощается умственный труд человека, предвосхищающего все дальнейшие действия машины, которые должны привести к правильному решению порученной ей задачи.

Наряду с универсальностью машина обладает огромной скоростью выполнения арифметических операций. Если уже первые электронные вычислительные машины выполняли десятки и сотни операций в секунду, то в настоящее время созданы машины с быстродействием порядка миллионов арифметических операций в секунду над 10-, 15-разрядными числами. Чтобы наглядно представить себе эту производительность, достаточно указать, что такая машина может в течение нескольких минут решить вычислительную задачу, на которую человеку необходимо затратить всю свою жизнь. В результате такой чисто количественный показатель, как

число арифметических операций, совершаемых машиной в 1 *сек*, обусловливает появление у этих машин новых качеств. Применение современной вычислительной техники позволяет человеству решать такие задачи, которые раньше были людям непосильны из-за их трудоемкости, так как для точного численного решения их требовались многие тысячи человеко-лет. Появилась возможность применения машин для управления быстропротекающими производственными процессами и различными видами сверхскоростного транспорта.

В этой области роль кибернетической техники в дальнейшем научно-техническом прогрессе человечества особенно важна. В самом деле, нервная система высших животных сформировалась в результате естественного отбора и воздействия окружающей среды в течение многих миллионов лет эволюционного развития. Человеческий род насчитывает около 100 тыс. лет своего существования. В течение всего этого периода развития и формирования нервных механизмов и наши предки — животные и человек сталкивались в окружающей среде с относительно малыми скоростями. Это были скорости движения воды в реках, ветра, бега других животных, полета птиц и пр. Все эти скорости, как правило, не превышали единиц, максимум десятков километров в час. К ним и приспособился механизм, осуществляющий важные для живого организма реакции на информацию, поступающую из внешней среды.

Время, необходимое человеку для выдачи в процессе управления целесообразного ответа на полученную информацию, складывается из времени, обусловленного инерционностью чувствительных элементов, времени проведения нервных импульсов от этих элементов к соответствующим центрам коры головного мозга и времени переработки информации мозгом, т. е. принятия целесообразного решения на основе полученной информации, времени проведения нервных импульсов от мозга к исполнительным органам и, наконец, времени срабатывания этих органов.

Это суммарное время от момента восприятия информации до осуществления реакции, как показывают результаты психофизиологических опытов, составляет не менее 0,1 *сек*. Таким образом, если навстречу друг другу летят два самолета со скоростью около 3 000 *км/ч*

каждый и если один из них покажется из облаков на расстоянии 150 *м* от другого, то они столкнутся до того, как летчики приступят к необходимому маневру. Причина аварии в этом случае будет заключаться в инерционности нервной системы человека и ограниченной скорости его реакций на внешние воздействия, обусловленной его биологической конструкцией.

Со значительно бо́льшими скоростями будут двигаться космические корабли, на которых будут осуществляться межпланетные сообщения, и, очевидно, быстрота реакции человека окажется совершенно недостаточной для предупреждения столкновений с внезапно встречающимися на их пути небольшими небесными телами типа метеоритов.

Аналогичные примеры можно привести и для случаев управления такими быстропротекающими процессами, как атомные или химические реакции. В этих случаях, если даже оператор и успеет заметить, что процесс развивается в нежелательном направлении, то вследствие замедленной реакции человека процесс может закончиться взрывом или другой аварийной ситуацией до того, как человек успеет принять необходимые меры.

Неоценимую помощь человеку в управлении такими быстропротекающими процессами могут оказать и уже оказывают кибернетические автоматы, способные решать за время, измеряемое миллисекундами, а иногда и долями миллисекунд, логические задачи, связанные с процессами управления различными объектами.

Таким образом, по скорости своей работы кибернетические устройства на много порядков превосходят возможности человеческого организма и в ряде случаев обеспечивают более точное решение задач управления.

Без применения новейших кибернетических средств автоматизации человек зачастую оказывается беспомощным в современных системах управления, так как он в силу своих психофизиологических возможностей не может быстро и одновременно воспринимать разностороннюю информацию о контролируемых процессах, не успевает достаточно оперативно принимать соответствующие решения и своевременно и целесообразно воздействовать на объекты управления. Кроме того, человеку свойственны сомнения, колебания, неуверенность, раздражение, усталость и прочие факторы, резко сказываю-

щиеся на точности и оперативности его управляющих воздействий. Кибернетическая машина, как управляющий агрегат, лишена этих недостатков.

Однако, несмотря на ряд неоспоримых преимуществ кибернетических устройств перед человеком, в самых сложных современных системах управления, включающих новейшие кибернетические автоматы, человек все же остается самым важным, а зачастую и самым надежным звеном этих систем. Это обусловлено многими решающими преимуществами человеческого организма перед современными автоматами.

Во-первых, современные кибернетические машины, как правило, работают по разработанной человеком жесткой программе, в которой заранее должны быть предусмотрены все возможные внешние ситуации и соответствующие им реакции машины. При возникновении же какой-либо непредвиденной ситуации подобная машина оказывается беспомощной и либо продолжает стихийное управление процессом, которое может закончиться аварией, либо — в лучшем случае — останавливает работу, прекращая дальнейшее протекание процесса.

Правда, уже разработаны различные виды самоорганизующихся систем, однако широкое практическое применение получили лишь системы простейшего типа — полностью детерминированные, относительно которых заранее известно, какие изменения необходимо внести в их структуру или программу работы, с тем чтобы при некоторых воздействиях внешней среды обеспечить их нормальное функционирование.

В этом отношении человек с его способностью к тончайшему анализу и синтезу явлений и присущими его нервной системе эффективными способами переработки информации стоит на значительно более высокой ступени, чем самые совершенные кибернетические машины. При этом значительно меньшая скорость выполнения человеком формально-логических операций компенсируется его способностью вместо кропотливой обработки всей поступающей информации использовать лишь наиболее важные данные для полноценной характеристики существенных черт управляемого процесса.

Физиологические механизмы и алгоритмы процессов мышления (обработки информации) и памяти (способов

хранения информации) пока можно считать почти полностью неясными. Раскрытие их позволило бы перейти к построению устройств, более полноценно моделирующих сложнейшие виды высшей нервной деятельности человека.

Другое важное преимущество живых организмов перед кибернетическими машинами заключается в значительно более гибких и совершенных устройствах восприятия внешней информации.

Для ввода информации в вычислительные машины в настоящее время широко применяется метод предварительной записи ее человеком на промежуточные носители (перфоленты, перфокарты или магнитные ленты), с которых информация далее автоматически считывается во вводных устройствах машины. При выводе информации из машин она, как правило, расшифровывается выводными устройствами и выдается человеку в виде печатного цифрового или буквенного текста.

Одна из задач кибернетической техники заключается в повышении гибкости общения машины и человека путем разработки вводных устройств, способных воспринимать информацию, закодированную различными удобными для оператора способами: в виде рукописного или печатного текста, чертежей, голосовых команд и т. п. Желательно также расширение возможностей устройств вывода, которые должны быть приспособлены для выдачи информации в виде чертежей, объемных изображений, речевого характера (в машинах для автоматического устного перевода) и пр.

Управляющие кибернетические машины, которые воспринимают сейчас информацию от сравнительно примитивных датчиков через посредство пассивных (не анализирующих и не отбирающих информации) фильтров, желательно снабдить так называемыми непримитивными датчиками, которые могли бы техническими средствами моделировать широкий класс ощущений — зрительных, слуховых, вибрационных, температурных и др. Они, таким образом, позволили бы кибернетической машине воспринимать, анализировать и распознавать визуальные изображения, звукосочетания и другие сложные картины внешней среды.

Решение этих задач усовершенствования органов связи машины с внешней средой и человеком требует

изучения соответствующих процессов в живых организмах с целью использования их в качестве прототипов для технических моделей.

Третье важное достоинство человека и других живых организмов по сравнению с техническими кибернетическими системами заключается в значительно более высокой надежности.

Действительно, техническое устройство, как правило, выходит из строя при отказе от работы любого блока или даже какого-либо элемента (лампы, транзистора, сопротивления, конденсатора и др.) и, наконец, при обрыве или коротком замыкании какой-либо цепи. Пока количество элементов в устройствах измерялось сотнями и тысячами при достаточно большом сроке службы этих элементов, выход из строя того или иного элемента происходил относительно редко и срок бесперебойной работы устройства от повреждения до повреждения составлял недели, месяцы, а иногда и годы.

Однако по мере усложнения устройств, когда количество элементов в них достигает сотен тысяч и миллионов, а в дальнейшем будет составлять сотни миллионов и более, даже при высокой надежности элементов и большом сроке службы их, повреждения могут происходить настолько часто, что устройство практически почти не будет работать. В живых организмах, центральная нервная система которых содержит миллиарды нейронов (нервных клеток), работоспособность системы сохраняется почти в полной мере при выходе из строя многих миллионов нейронов. Это объясняется особой структурой нервных сетей, благодаря которой они обладают высокой надежностью, хотя элементы (нейроны), из которых они составлены, имеют относительно невысокую надежность.

Наконец, все биологические управляющие системы неоспоримо превосходят технические устройства с точки зрения миниатюрности своих элементов и экономичности их работы. Достаточно указать, что 10—15 млрд. нейронов, которые содержатся в мозгу человека, занимают объем всего лишь около 1,5 *дм*³, а общее потребление энергии мозгом не превышает десятков ватт. Каждый нейрон, как известно, может находиться либо в возбужденном, либо в заторможенном состоянии, т. е. он представляет собой элемент с двумя устойчивыми состоя-

ниями, подобный по своему действию двухпозиционному реле.

Для того чтобы нагляднее представить себе экономичность и ничтожные габариты нейронов, предположим, что мы захотели бы создать техническое устройство с количеством элементов релейного действия, соответствующим количеству нейронов, имеющихся в головном мозгу человека (порядка 10^{10}). Предположим, что в качестве таких технических элементов мы использовали бы триггеры на полупроводниковых приборах объемом 1 *см*^{3} каждый, потребляющие мощность по 0,1 *вт*. Тогда общий объем такого устройства при условии, что триггеры были бы упакованы вплотную один к другому, составил бы 10^4 *м*^{3}, а потребляемая мощность достигала бы 1 млн. *квт*. Значит, такое устройство имело бы размеры небоскреба (10×10 *м* в основании и высотой 100 *м*) и потребовало бы источника энергии с мощностью, равной мощности большой современной гидроэлектростанции.

Если сравнить эти величины с объемом мозга (1,5 *дм*^{3}) и потреблением им энергии (до 10 *вт*), то становится очевидным, насколько далеки еще технические устройства от биологических систем по габаритам и экономичности.

Продолжая подобные сравнения, можно указать на удивительные механизмы ориентации некоторых живых организмов в пространстве, например пчел, голубей и рыб. Можно также указать на исключительную сложность и целесообразность всевозможных химических процессов в органической природе, на изумительно точные и гибкие системы саморегулирования температуры тела, кровяного давления, состава крови и других показателей, на экономичные способы преобразования химической энергии в механическую в мышечных тканях и пр.

В результате многих миллионов лет эволюционного развития и естественного отбора в живых организмах выработались весьма тонкие и совершенные механизмы процессов обмена веществ, преобразований энергии и информации. Исследование этих механизмов для использования познаний о них при разработке и конструировании различных технических устройств и является содержанием нового направления в науке — бионики (от слова биос — жизнь).

Таким образом, бионику определяют как научное направление, занимающееся изучением биологических процессов и методов с целью применения полученных знаний для усовершенствования старых и создания новых машин и систем. Ее можно назвать также наукой о системах, характеристики которых приближаются к характеристикам живых систем.

В связи с этим следует подчеркнуть существенное различие задач бионики и биологической электроники. Последняя занимается вопросами разработки и применения электронной аппаратуры для биологических исследований именно с целью познания биологических процессов, а также для воздействия на эти процессы, а не для использования раскрытых биологических закономерностей в технике. Отличные от бионики задачи ставятся и перед медицинской электроникой, рассматривающей вопросы создания и применения электронной аппаратуры для производства медицинских анализов, для диагностических, терапевтических и хирургических целей.

Однако, несмотря на различие целей этих отраслей знания, как в бионике, так и в биологической и медицинской электронике может применяться для исследований одинаковая или весьма сходная аппаратура, что обусловливает важность самых тесных контактов между специалистами, работающими в этих областях.

Бионика в широком смысле слова, как уже говорилось, имеет дело с самыми разнообразными характеристиками живых организмов, переносимыми в технические системы, включая характеристики вещественных, энергетических и информационных процессов. Однако широкое распространение получил также более узкий подход к бионике с кибернетических позиций, когда в бионике рассматриваются лишь вопросы, связанные с процессами управления и связи, т. е. методы и механизмы восприятия, передачи и переработки информации в живых организмах с целью использования этих методов при проектировании различных видов кибернетической аппаратуры, которая все шире внедряется в науку и народное хозяйство.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

НЕЙРОНЫ И НЕРВНЫЕ СЕТИ, ИХ ТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

1. НЕЙРОНЫ И НЕРВНЫЕ СЕТИ

Кибернетика устанавливает общность процессов управления и связи в живых организмах и кибернетических устройствах. Однако наряду с общими свойствами между ними имеются и весьма существенные различия в поведении и характеристиках. Эти различия объясняются не только количеством «кирпичиков» — элементов, из которых построены сети управления, но и свойствами этих элементов.

Нейрон живого организма представляет собой элемент, который может находиться в двух состояниях — возбуждения и торможения. Таким образом, нейрон в весьма упрощенной трактовке по своим функциям может быть уподоблен двухпозиционному элементу типа реле (электромеханического, лампового, транзисторного). Однако неправильно представлять себе дело таким образом, что достаточно создать кибернетическое устройство с количеством реле, приближающимся к количеству нейронов в организме (порядка 10^9—10^{10} и более элементов), чтобы это устройство могло полноценно имитировать свойства живых организмов. Одна из причин этого заключается в несравненно большей гибкости нейронов по сравнению с современными техническими элементами, что обусловлено значительно более сложной и тонкой организацией нейрона.

Создание сложно организованных кибернетических систем требует использования технических элементов, значительно превосходящих по своим логическим воз-

можностям современные относительно примитивные двухпозиционные элементы релейного действия. При этом, наряду с методами инженерного синтеза новых элементов с заданными характеристиками, возможен и другой путь — заимствования некоторых свойств и логических решений и органической природы путем изучения структуры и функций нейронов и создания более или менее адекватных им технических моделей. Очевидно, что если выбрать этот путь, то прежде всего необходимо ознакомиться с основами строения и функциями нейронов и нервных сетей.

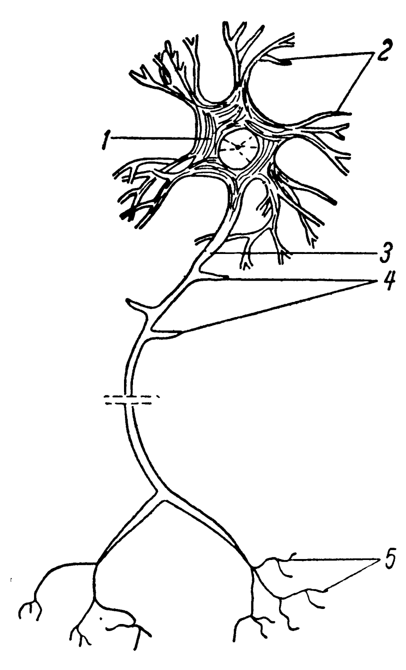


Рис. 1. Схематическое изображение нейрона.

1—тело клетки, *2*—дендриты; *3*—аксон; *4*—коллатерали; *5*—концевое разветвление аксона.

Нейрон представляет собой основной структурный элемент нервной системы. Существует значительное количество различных типов нейронов, отличающихся друг от друга как по своему строению, так и по функциям, т. е. имеющих некоторую специализацию.

Схематическое изображение нейрона приведено на рис. 1. При исследовании под микроскопом удается различить три основные части нейрона: тело клетки; дендриты — древовидные отростки — входы, по которым к телу клетки подводятся импульсы раздражения, и аксон, или нейрит, — волокно, являющееся выходом, по которому проводится возбуждение из клетки.

Тело клетки имеет обычно размеры менее 0,1 *мм*. Тело и аксон окружены мембраной, которая отделяет содержимое клетки от окружающей среды. Дендриты имеют диаметр порядка 0,01 *мм* и длину от долей милли-

метра до десятков сантиметров. Количество их отростков может достигать нескольких десятков и даже сотен. Боковые поверхности отростков дендритов в свою очередь покрыты своеобразными выростами или шипиками, имеющими вид плотной ножки диаметром менее 0,5 *мк*, заканчивающейся утолщением. Общее количество шипиков на дендроидной системе одной клетки может достигать десятков тысяч. Роль шипиков в настоящее время еще не выяснена, но имеются предположения, что они служат для восприятия нервных импульсов от других нервных клеток.

Длина аксона нервных клеток человека колеблется от долей миллиметра до 1,5 *м*. Аксон заканчивается концевым разветвлением, или «кисточкой». Кроме того, у аксона имеются короткие боковые ответвления — коллатерали, образующие с соседними нейронами сложные сети. Аксоны составляют осевую часть нервных волокон, пучки которых образуют нервы.

Нервы в организме играют роль линий связи между рецепторными нервными клетками с чувствительными окончаниями, воспринимающими информацию, скоплениями нейронов, предназначенных для обработки информации, и исполнительными, или эффекторными, клетками, обеспечивающими соответствующие реакции отдельных органов или участков организма.

Совокупность всех этих элементов, предназначенных для восприятия, проведения и переработки информации, а также для выдачи управляющей информации, образует нервную систему. Таким образом, нервная система осуществляет связь организма с внешней средой, взаимосвязь органов и тем самым регуляцию и координацию всех функций организма.

Функционально вся деятельность нервной системы основана на процессах возбуждения и торможения. Возбуждение возникает под влиянием электрических, тепловых, химических и механических раздражений и распространяется по нервной системе в виде нервных импульсов, скорость проведения которых по нервным волокнам не превышает 120 *м/сек* (у человека); у беспозвоночных животных эта скорость значительно ниже.

Сами по себе нервные волокна способны проводить импульсы возбуждения в равной степени в обоих направлениях. При этом в них возникают так называемые

токи действия, обусловленные тем, что возбужденная часть нерва становится электроотрицательной по отношению к части, находящейся в состоянии покоя.

Однако в организме все нервные волокна в естественных условиях своего функционирования проводят импульсы возбуждения всегда лишь в одном направлении — от центра к периферии (центробежные нервы) или от периферии к центру (центростремительные нервы). Такое одностороннее проведение импульсов объясняется особыми свойствами **синапсов**, т. е. мест перехода возбуждения от одной нервной клетки к другой, или, другими словами, областей связи (контакта) нервных клеток друг с другом.

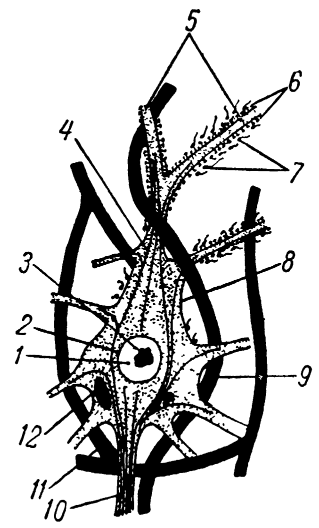


Рис. 2. Детали строения нейрона.

1 — ядро; *2* — ядерная оболочка; *3* — хроматин ядра; *4* — нейрофибриллы; *5* — дендриты; *6* — шипики; *7* — синапсы; *8* — оболочка клетки; *9* — артериальный капилляр; *10* — аксон; *11* — венозный капилляр; *12* — хроматиновое вещество.

Синапс проводит возбуждение только в одном направлении — с окончаний аксона одного нейрона на дендриты и клеточное тело другого нейрона. Расположение синапсов, а также некоторые детали строения нейрона показаны на рис. 2, из которого видно, что каждый нейрон может возбуждаться через множество синаптических контактов, расположенных вдоль дендритов и тела нейрона. Количество синапсов на крупных нейронах может изменяться тысячами.

Передача возбуждения через синапс наряду с его односторонней проводимостью характеризуется и другими интересными особенностями. В синапсе происходит замедление проведения возбуждения: возникает так называемая синаптическая задержка. Прохождение возбуждения через синапс как бы подготавливает почву и облегчает прохождение через него следующего возбуждения. Одно из объяснений механизма этого явления заключается в том, что при поступлении раздражения

в синапсах происходит выделение особого вещества — ацетилхолина, играющего роль медиатора (химического посредника) при передаче нервного возбуждения. После накопления определенного количества медиатора происходит возбуждение нейрона, который ведет себя, таким образом, как пороговый элемент.

Однако по современным представлениям у высокоорганизованных животных основная роль при передаче возбуждения через синапсы отводится не химическим посредникам, а так называемым электрическим потенциалам действия, подводимым к синапсам от разветвлений аксона. Такое объяснение механизма передачи возбуждения больше соответствует действительной его скорости. Ацетилхолин при этом играет роль не переносчика возбуждения, а вещества, повышающего возбудимость нейрона и облегчающего реакцию клетки на последующие импульсы.

Еще одно важное свойство нейронов, обусловливающее сложность и гибкость их логических возможностей, заключается в способности к пространственному и последовательному (временнóму) суммированию раздражений.

Пространственное суммирование заключается в том, что уровни отдельных раздражений, недостаточные для возбуждения нейрона, будучи приложены к нему одновременно через два или несколько синапсов, могут вызвать срабатывание нейрона (его возбуждение).

Последовательным суммированием, или суммированием во времени, называют явление, заключающееся в том, что подпороговые раздражения, следующие одно за другим через достаточно короткие промежутки времени, также приводят к возбуждению нейрона. В механизме возбуждения нейрона часто происходят процессы суммирования раздражений как в пространстве, так и во времени. При этом следует учитывать, что роль предыдущих импульсов раздражения для возбуждения нейрона становится тем меньшей, чем больше времени прошло после их появления. Имеет место как бы затухание их следов, которое происходит приблизительно по экспоненциальному закону.

Импульсы раздражения могут оказывать на нейрон не только возбуждающее, но и тормозящее действие. Затормаживающий импульс может сделать невозмож-

ным срабатывание нейрона от импульсов других входов. Источником тормозящих импульсов по теории, предложенной Экклсом, являются особые вставочные нейроны (клетки Реншау), которые возбуждаются обычными нервными импульсами. Аксоны клеток Реншау заканчиваются на других клетках синапсами, выделяющими особый медиатор тормозящего действия.

После срабатывания нейрона возбудимость его претерпевает ряд изменений. Эти процессы иллюстрируют-

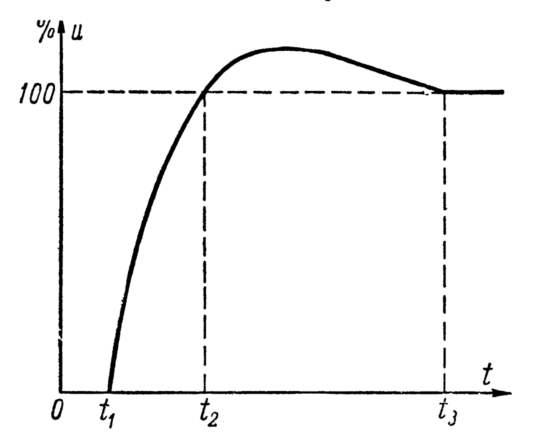


Рис. 3. Кривая изменения возбудимости нейрона.

ся кривой, показанной на рис. 3, где по оси абсцисс отложено время t, истекшее после срабатывания, а по оси ординат — относительная возбудимость u нейрона в процентах. Как видно из рисунка, следующее срабатывание нейрона может произойти лишь через некоторый промежуток времени t_1, который носит название периода абсолютной рефрактерности и длится от 0,4 до 2 *мсек.* В течение этого времени пороговый уровень нейрона как бы оказывается равным бесконечности, а возбудимость его равна нулю. После окончания такого периода полной невосприимчивости происходит постепенное, в течение нескольких десятков миллисекунд, снижение порогового уровня до нормальной величины. Этот период (от момента t_1 до t_2) носит название периода относительной рефрактерности. По-видимому, явление рефрактерности обусловливается необходимостью восстановления энер-

гетических ресурсов нервной клетки, расходуемых во время функциональной деятельности нейрона.

После окончания периода относительной рефрактерности наступает фаза повышенной возбудимости (период t_2—t_3), в течение которой возбуждение нейрона может возникнуть и при воздействии раздражения подпороговой величины. Наконец, в некоторый момент времени t_3 восстанавливается нормальная возбудимость нейрона.

Импульс, выдаваемый нейроном при срабатывании, характеризуется, как правило, некоторой стандартной амплитудой и длительностью, так что энергию импульса в первом приближении можно считать постоянной по величине.

2. ТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОНОВ

При техническом моделировании тех или иных процессов, элементов и узлов живых организмов, осуществляемом с позиций бионики, отнюдь не следует стремиться к воспроизведению всех характеристик оригиналов. Так как бионика преследует цели создания высокосовершенных кибернетических устройств, то разумно стремиться к моделированию лишь тех функций и характеристик, которые повышают гибкость, надежность, экономичность и другие показатели кибернетической техники. В то же время целесообразно создавать модели, лишенные недостатков своих биологических оригиналов.

Например, при моделировании нейрона желательно, с одной стороны, по возможности более полно воспроизвести его гибкие логические функции, обусловленные описанной ранее способностью к пространственному и временно́му суммированию раздражений и множественностью входов. С другой стороны, моделирование такого явления, как относительно длительный период рефрактерности, биологически обусловленный необходимостью отдыха и восстановления энергетических ресурсов клетки, может оказаться необязательным, а зачастую и нежелательным в технических моделях нейронов.

Создавая техническую модель нейрона (рис. 4), целесообразно, по-видимому, принимать во внимание следующее:

1. Схема модели нейрона должна иметь множество (n) входов, на которые могут в различные моменты времени поступать сигналы p_1, $p_2, ..., p_n$.

2. Входные сигналы воздействуют на нейрон через синаптические контакты. Величина, характеризующая степень влияния данного входа на состояние нейрона, называется весом входа или синаптическим числом: S_1, $S_2, ..., S_n$.

3. В синаптических контактах происходит задержка поступающего сигнала на некоторое время t_c.

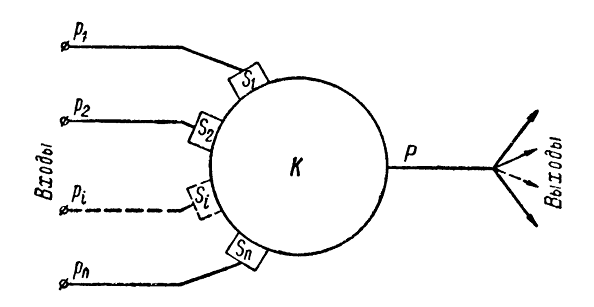


Рис. 4. Модель нейрона (схематическое изображение).

4. Воздействие некоторого i-го входа на тело нейрона в момент времени t количественно характеризуется произведением $p_i S_i$.

5. Результирующее воздействие на тело нейрона определяется суммой воздействий от всех n входов (пространственное суммирование) и предысторией, т. е. суммой предшествующих воздействий с учетом затухания их по экспоненциальному закону с некоторой постоянной времени τ (суммирование во времени).

6. Срабатывание (возбуждение) модели нейрона должно происходить лишь в том случае, если результирующее воздействие превысит некоторое пороговое значение K.

7. При срабатывании модель нейрона должна выдавать на параллельные выходы, соответствующие концевым разветвлениям аксона, стандартный сигнал P.

Рассмотрим несколько моделей нейронов, созданных в различных институтах и лабораториях.

На рис. 5 изображена типичная модель нейрона, разработанная в одном из университетов США. Основной частью схемы является одновибратор (ждущий мультивибратор), собранный на двух транзисторах: T_2 и T_3 типа *n-p-n*. В устойчивом состоянии одновибратора транзистор T_2 заперт отрицательным напряжением, подаваемым на его базу с сопротивления R_6. Значением этого

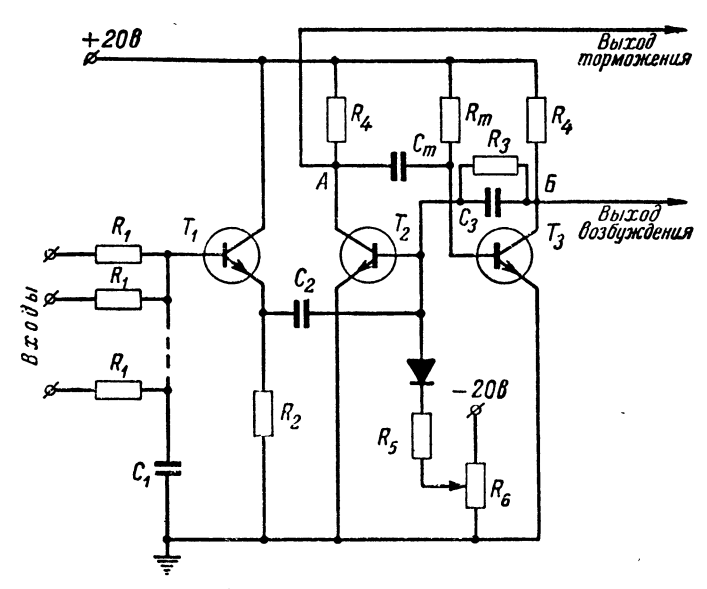


Рис. 5. Модель нейрона.

напряжения определяется пороговая величина срабатывания модели нейрона. Пока транзистор T_2 заперт, транзистор T_3 находится в отпертом состоянии. При этом потенциал коллектора транзистора T_2 (точки *А*) равен напряжению питания +20 *в*, а коллектор транзистора T_3 (точка *Б*) находится под низким положительным потенциалом, обусловленным падением напряжения на сопротивлении нагрузки R_4.

При срабатывании одновибратора, когда происходит запирание транзистора T_3 и отпирание транзистора T_2, потенциал точки *А* скачком снижается, а потенциал точки *Б* возрастает. В результате этого на выход возбуждения выдается положительный, а на выход тормо-

жения — отрицательный импульс напряжения. Длительность последнего определяется значениями сопротивления $R_т$ и емкости конденсатора $C_т$.

Время восстановления схемы (возвращения ее в начальное состояние) определяется в основном емкостью конденсатора C_3 и отчасти емкостью конденсатора C_2. В описываемой схеме это время путем регулировки величин емкостей конденсаторов C_2 и C_3 можно изменять в пределах от 1 до 50 *мсек*.

Суммирование входных возбуждающих (положительных) и тормозящих (отрицательных) сигналов происходит на входе схемы, содержащей сопротивления R_1, включенные во входные цепи, конденсатор C_1 и транзистор T_1, включенный по схеме эмиттерного повторителя для устранения межсхемных влияний. Таким образом, имитируются процессы пространственного суммирования воздействий, поступающих на различные параллельно включенные входы, и временно́го суммирования благодаря накоплению энергии в конденсаторе C_1. Рост потенциала на конденсаторе носит экспоненциальный характер.

На входы модели нейрона подаются импульсы с фиксированной амплитудой и длительностью 1 *мсек*, случайно распределенные во времени. На выходах схемы при ее срабатывании получается стандартный импульс длительностью 1 *мсек* напряжением 15 *в*. Предельная частота срабатываний равна 500 *гц*.

Рассмотренная схема позволяет довольно хорошо моделировать основные характеристики биологического нейрона. Однако она не обладает свойством, эквивалентным адаптации, т. е. изменения порога срабатывания в зависимости от величины входных сигналов.

Кроме описанной схемы, предложен ряд других вариантов моделей нейрона на лампах и транзисторах. Эти модели отличаются друг от друга как своими функциональными характеристиками, так и временны́ми параметрами. Разработано также несколько вариантов моделей нейрона на магнитных элементах, в которых, используя частичное перемагничивание, легко имитировать пороговые свойства и процессы суммирования входных воздействий.

Один из элементов подобного типа на сердечнике со многими отверстиями, изготовленном из материала

с прямоугольной петлей гистерезиса, показан на рис.6. Работа его основана на перераспределении потоков и в принципе подобна работе трансфлюксора. По обмотке смещения *1* пропускается постоянный ток достаточной величины, для того чтобы намагнитить все сечение сердечника до насыщения. При этом поток $\Phi=\Phi_1+\Phi_2$ во всех сечениях сердечника имеет одно и то же направление, например по часовой стрелке.

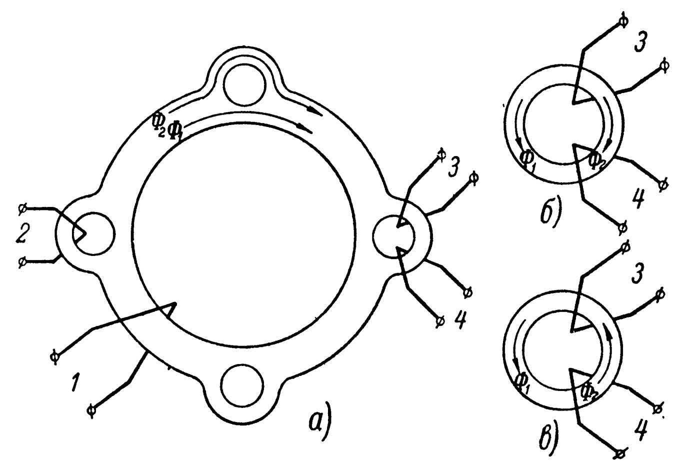


Рис. 6. Пороговый элемент на многоотверстном сердечнике.
а — общий вид; *б* — область вокруг выходного отверстия в начальном состоянии; *в* — область вокруг выходного отверстия в возбужденном состоянии.

Такое состояние сердечника будем считать начальным или заторможенным. При этом магнитное состояние зоны вокруг правого малого отверстия показано на рис. 6,*б*. Эту зону можно, очевидно, рассматривать как намагниченный до насыщения отдельный сердечник, в обоих полукольцах которого магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 направлены навстречу друг другу. Через малое отверстие продеты обмотки *3* и *4*. Обмотка *3* непрерывно питается переменным током, а обмотка *4* является выходной обмоткой элемента. Магнитодвижущая сила, создаваемая переменным током, в один полупериод будет совпадать по направлению с потоком Φ_1 в левой части зоны, а в другой полупериод — с потоком Φ_2 в правой части зоны. Так как весь материал находится в состоя-

нии насыщения и дальнейшее увеличение потока в нем практически невозможно, то в обмотке *4* не будет индуктироваться э. д. с., что соответствует отсутствию сигнала на выходе модели нейрона.

Обмотка *2* служит входной обмоткой элемента, в которую подается суммарный ток входных сигналов. Если этот суммарный ток достигнет некоторой пороговой величины, то произойдет переключение (изменение направления) магнитного потока Φ_2 в наружной части сечения сердечника. При этом магнитное состояние зоны вокруг малого отверстия будет таким, как это показано на рис. 6,*в*. Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 будут протекать по кольцевой зоне вокруг малого отверстия, против часовой стрелки. Тогда магнитодвижущая сила, создаваемая переменным током обмотки *3*, в один полупериод будет совпадать с магнитным потоком и он вследствие состояния насыщения не будет практически изменяться по величине. Однако в другой полупериод при встречном направлении м. д. с. и потока последний будет уменьшаться. Затем, в следующий полупериод величина его будет восстанавливаться и т. д. Вследствие изменений магнитного потока в обмотке *4* будет индуктироваться переменная э. д. с. и на выход элемента будет выдаваться сигнал до тех пор, пока после окончания достаточного по величине входного воздействия элемент под действием тока в обмотке смещения не перейдет опять в начальное невозбужденное состояние.

Другие свободные малые отверстия сердечника могут быть использованы для разнообразных логических связей при моделировании сложных нервных сетей.

В литературе описаны также модели нейронов, основанные на электрохимических, термических и других явлениях. В частности, приводится сообщение о разработке так называемого нейристора — активного прибора с некоторыми свойствами нейрона. Нейристор характеризуется подобно нервным волокнам незатухающим распространением энергии, которое происходит с однородной скоростью, а также некоторым временем восстановления свойств проведения импульсов. Основа нейристора состоит из полоски термисторного материала, играющего роль активной части прибора. Параллельно этой полоске создается конденсатор с распределенной емко-

стью, служащий как бы накопителем и резервуаром энергии.

При локальном возбуждении нейристора энергия, накопленная в возбужденном участке, вызывает местный нагрев термисторного материала. Это в свою очередь вызывает возбуждение соседних участков, которые также срабатывают, высвобождая энергию, и т. д. Таким образом, происходит движение волны возбуждения с равномерной скоростью и без затухания вдоль канала. Разрядившиеся же участки могут быть возбуждены вновь лишь после накопления ими энергии, что соответствует периоду восстановления нейрона.

Нейристоры могут быть использованы в качестве моделей запоминающих и логических элементов. Соединение их в сложные сети может выполняться без пассивных соединительных элементов, которые вносили бы в схему элемента неоднородности, что в свою очередь могло бы исказить передаваемый по такой цепи сигнал.

ГЛАВА ВТОРАЯ

МЕХАНИЗМЫ КОДИРОВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

3. О КОДИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ

Основное содержание всех процессов управления в живых организмах, в обществе и технике заключается в восприятии, накоплении, переработке и использовании разнообразной информации. При этом помехоустойчивость и надежность различных информационных устройств в значительной степени зависят от способов кодирования информации, а экономичность и габариты их — от принципов, которые положены в основу конструкции отдельных элементов и ячеек, предназначенных для накопления и хранения информации.

Пример исключительного совершенства, гибкости и экономичности являют собой механизмы кодирования, накопления, хранения и передачи по наследству информации в живых организмах, выработавшиеся в результате многих миллионов лет эволюционного развития органического мира.

При конструировании кибернетических устройств инженеры могли бы заимствовать в качестве прообра-

за некоторые из механизмов информационных процессов в живых организмах. К сожалению, многое в этом еще неясно для науки. Однако стремительное развитие современной биологии и смежных с нею областей знания — биофизики и биохимии, основанное на все более широком использовании радиоэлектронной и кибернетической аппаратуры, а также математических методов обработки результатов эксперимента и описания биологических процессов, позволяет ожидать значительных успехов в раскрытии тайн механизмов управления в живых организмах.

Одной из интереснейших и очень важных проблем с практической точки зрения является проблема хранения и передачи в живых организмах наследственной информации, несущей в себе сведения о структуре и огромном многообразии свойств потомства. Если напомнить, что диаметр клетки, как правило, не превышает десятков микрон, то становится ясно, насколько сложным и совершенным должен быть механизм хранения в клетке огромного числа признаков, свойственных данному виду организма.

В соответствии с современными научными воззрениями основное значение в передаче наследственной информации имеют нуклеиновые кислоты. Они играют в клетке роль, подобную роли перфорированной ленты или перфокарты в цифровых вычислительных машинах. Подобно тому как на перфорированных носителях информация записана в виде определенного чередования пробитых и непробитых мест, нуклеиновые кислоты несут информацию, которая определяется линейной комбинацией нескольких основных повторяющихся единиц, определенным образом располагающихся по длине молекул.

Различают два вида нуклеиновых кислот — дезоксирибонуклеиновую кислоту (ДНК) и рибонуклеиновую кислоту (РКН).

Эти кислоты, хотя и похожи по своему химическому составу, отличаются друг от друга как по структуре, так и по функциям.

Основная функция носителя наследственной (генетической) информации принадлежит ДНК. Химический состав и количественное содержание ДНК во всех клетках данного живого организма одинаковы.

По мере усложнения организмов увеличивается и количество ДНК в их клетках. Так, если в клетках бактерий имеется около 10^8 нуклеотидов (структурных единиц) ДНК, то у млекопитающих на каждую клетку приходится уже до 10^{10} нуклеотидов.

Молекулу ДНК можно представить в виде двух полинуклеотидных цепочек, закрученных одна относительно другой (рис. 7). При делении родительской клетки две молекулярные цепи, образующие двойную спираль ДНК, отделяются одна от другой и служат как бы матрицами, на которых строятся из нуклеотидов вторые цепи в дочерних молекулах ДНК.

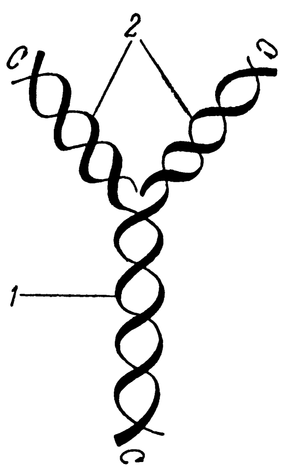


Рис. 7. Схема, иллюстрирующая механизм удвоения молекул ДНК.
1 — родительская спираль; 2 — дочерние спирали.

Все сказанное может быть использовано для объяснения процессов самовоспроизведения структуры ДНК в новых клетках при клеточном делении. Однако еще неясно, каким образом наследственное вещество управляет развитием остальной части клетки. Предполагают, что пары оснований (пурины и пиримидины), присоединенные к углеводам в молекулах ДНК, образуют подобно точкам и тире кода Морзе некий генетический код, управляющий внутриклеточными процессами. При этом количество ДНК, заключенное в одной клетке человеческого тела, оказывается достаточным для того, чтобы закодировать информацию, которая содержится в библиотеке из тысячи солидных томов.

Современный уровень наших знаний не позволяет пока дать исчерпывающий ответ на вопрос о том, как фактически используются эти возможности в живых организмах, какие здесь применяются коды, насколько они экономичны, какими средствами достигается их чрезвычайно высокая помехоустойчивость и пр. Несомненно, однако, что изучение биофизиками и биохимиками механизмов кодирования информации в живых клет-

ках может оказаться весьма полезным и для математиков и инженеров, работающих в области технической кибернетики.

Существенный интерес для инженера могут также представить способы кодирования информации при ее передаче по нервным путям к соответствующим участкам центральной нервной системы.

Так, фоторецепторы глаза осуществляют преобразование светового раздражения в сигнал соответственно сложной импульсно-кодовой модуляционной характеристике. В начале светового раздражения в нервный канал выдаются импульсы с большой частотой. Затем при постоянной интенсивности освещения частота импульсов уменьшается. Новое повышение интенсивности приводит к повышению частоты по некоторому нелинейному закону, после чего частота опять начинает снижаться. Таким образом, рецепторы кодируют информацию об интенсивности раздражителя, искажая ее в полезном, жизненно важном для организма направлении: они подчеркивают всякие изменения движений, совершающихся в окружающей среде. Этот механизм кодирования соответствует разработанной в последние годы системе дельта-модуляции, при которой по каналу связи передаются не абсолютные значения сигнала, а лишь сведения об изменении его амплитуды.

Описанное явление адаптации (привыкания) органов восприятия к сигналам с неизменяющимися характеристиками было особенно наглядно подтверждено опытами Ярбуса. Он укреплял на глазном яблоке человека присоску с вмонтированным в нее источником изображения, проектировавшимся на сетчатку. Присоска двигалась вместе с глазным яблоком и, следовательно, проекция изображения была неподвижной относительно поля рецепторов сетчатки. При неизменной интенсивности изображения зрительное восприятие его через некоторое время вообще прекращалось — возникало так называмое «пустое поле». При изменении интенсивности освещения изображение становилось видимым, но затем опять исчезало. Восприятие изображения восстанавливалось также при использовании мелькающего источника света, если только это мелькание совершалось с частотой, не превышающей некоторое критическое значение.

Для того чтобы в нормальных условиях человек все-таки мог видеть окружающие его неподвижные предметы, существует так называемый дезадаптационный процесс. Этот процесс заключается в незначительных колебательных движениях глаза, изменяющих освещенность отдельных участков сетчатки, и возникновении в рецепторах соответствующих разностных сигналов.

Можно было бы привести еще немало примеров того, как в живых организмах вскрываются механизмы кодирования и обработки информации, сходные с наиболее совершенными методами, применяемыми в технике. Очевидна перспективная плодотворность и обратного процесса, заключающегося в дальнейшем раскрытии соответствующих механизмов в органическом мире и перенесении их на иной, материальной, основе в технику для создания новых, все более совершенных кибернетических устройств.

4. ПАМЯТЬ МАШИНЫ И ЧЕЛОВЕКА

В предыдущем параграфе были рассмотрены некоторые вопросы, относящиеся к механизмам хранения и передачи наследственной информации, осуществляющей сохранение видов живых организмов. Эти механизмы несут в себе информацию о строении организма потомства, его основных функциональных характеристиках, передают по наследству безусловные рефлексы и инстинкты.

Однако в процессе роста и развития каждого индивидуума в нем происходит дальнейшее накопление огромных количеств информации, связанное с фиксацией жизненного опыта, образованием новых связей и условных рефлексов, обучением и самообучением. Таким образом, происходит формирование поведения живого организма, которое оказывается обусловленным как унаследованной от родителей, врожденной информацией, так и информацией благоприобретенной, поступившей и продолжающей непрерывно поступать из внешней среды.

Емкостью и гибкостью устройств хранения информации, т. е. механизмов памяти, в значительной степени определяются возможности формирования сложной системы поведения данного организма.

Логические возможности, быстродействие и ширина диапазона решаемых задач у кибернетических машин

также в значительной степени определяются характеристиками их блоков хранения информации. Так как выполнение каждой элементарной операции требует, как правило, обращения к блоку памяти, то и скорость выполнения операции, даже при весьма быстродействующих арифметических устройствах, ограничивается временем обращения к запоминающему устройству (ЗУ).

С другой стороны, решение сложных вычислительных задач или задач управления, которые также сводятся к последовательностям вычислительных и логических операций, требует ЗУ большого объема, способные вместить программу обработки информации с весьма большим количеством команд. Кроме того, в кибернетических устройствах целесообразно хранить некоторые неизменные части программы (так называемые подпрограммы, пригодные при решении различных задач), постоянные коэффициенты и справочные данные в отдельных блоках хранения, называемых постоянными ЗУ.

Однако такие требования, как большая емкость и быстродействие (время обращения), противоречивы. При большой емкости ЗУ приходится усложнять их адресную часть, предназначенную для отыскания той запоминающей ячейки, в которой должна быть прочитана или записана соответствующая информация. Время поиска ячейки по заданному адресу увеличивается с увеличением емкости ЗУ.

В современных больших универсальных вычислительных машинах требуется хранить информацию в объеме сотен, тысяч и миллионов чисел (слов). Машины, предназначенные для перевода с одного языка на другой, и справочные логически-информационные машины должны иметь объем памяти, исчисляемый десятками и сотнями миллионов слов.

Применяя для хранения информации сменные бобины с магнитными лентами, можно легко получить практически неограниченный объем ЗУ. В самом деле, при плотности записи порядка десятков импульсов на миллиметр (одно число на 1 *мм*) на катушке магнитной ленты длиной 500 *м* можно записать около 500 000 чисел, а на сотне таких катушек можно хранить $5 \cdot 10^7$ чисел. Однако поиск ячейки в таком устройстве, требующий смены бобины и перемотки ленты, требует време-

ни порядка нескольких минут. В одном из наиболее совершенных ЗУ с записью на магнитной ленте емкостью более $1 \cdot 10^7$ слов время обращения удалось довести до 0,5 *сек*, но и это время совершенно не согласуется с временем выполнения арифметической операции, которое в лучших современных машинах составляет единицы и даже доли микросекунды.

Поэтому, говоря о емкости ЗУ вычислительной машины, подразумевают обычно емкость так называемого оперативного ЗУ, время обращения к которому должно быть соизмеримо с временем выполнения элементарной арифметической операции.

Учитывая, что кибернетические машины предназначаются для механизации определенных процессов человеческого мышления, уместно привести здесь некоторые сравнительные данные, характеризующие память человека и ЗУ электронных цифровых машин.

Прежде всего нужно отметить колоссальную емкость памяти человека. Как уже указывалось ранее, наш мозг содержит около 14 млрд. нейронов, которые при упрощенной трактовке их функций можно представить себе как двоичные запоминающие элементы. Если округлить число нейронов до 10 млрд. (10^{10}), то при таком количестве запоминающих элементов принципиально возможно запоминать 10^{10} двоичных единиц (дв. ед.) информации.

Максимальная емкость ЗУ современных вычислительных машин весьма далека от этой величины, причем машины, которые будут построены в ближайшие годы или даже десятилетия, едва ли могут быть снабжены ЗУ подобной емкости. Достаточно указать, что общее количество всех электронных ламп и транзисторов, имеющихся в настоящее время на земном шаре, соизмеримо с количеством нейронов в мозгу одного человека.

В расчетах фактически используемой емкости памяти человека существует значительное расхождение. Ее оценивают величиной от 100 млн. (10^8) до миллиона миллиардов (10^{15}) и даже до 10^{20} дв. ед. Если принять любой предел емкости памяти, превышающий 10^{10} дв. ед. (что соответствует количеству нейронов), то нужно считать, как это предлагают некоторые ученые, что каждый нейрон, являясь сам по себе сложной системой, может накапливать значительное количество информации.

Одна из оценок пределов емкости человеческой памяти, предложенная Миллером, основывается на следующих рассуждениях. В качестве минимального предела он предложил установить объем памяти в 1,5 млн. дв. ед., исходя из того, что человек, по его наблюдениям, способен запомнить по меньшей мере тысячу объектов, эквивалентных по сложности таблице умножения (количество информации, содержащееся в таблице умножения, равно около 1 500 дв. ед.).

При определении верхнего предела фактического объема памяти человека Миллер руководствовался следующим. Психофизиологическими наблюдениями установлено, что максимальная пропускная способность (скорость ввода информации) органов восприятия человека не превышает 25 дв. ед. в секунду. Таким образом, если предположить, что ввод информации в человека происходит непрерывно по 16 *ч* в сутки, то общее количество введенной и подлежащей запоминанию информации, скажем, за 80 лет может составить $25 \cdot 3\,600 \cdot 16 \cdot 365 \times$ $\times 80 = 42$ млрд. дв. ед.

Нижний из этих пределов (по-видимому, сильно преуменьшенный) уже сейчас может быть практически реализован в ЗУ большой электронной машины. Верхний предел (явно завышенный, так как человек не может непрерывно вводить в себя новую информацию) принципиально также может быть реализован в ЗУ ограниченного объема. Так, в фотоскопических ЗУ можно было бы соответственно огромной разрешающей способности фотографических материалов достичь плотности записи до 5 млрд. дв. ед. на кубический дециметр. Однако современная техника не знает удовлетворительных методов записи и считывания информации при такой огромной плотности записи. Здесь, очевидно, пришлось бы для записи применять лучевые дифракционные методы, а для считывания — методы электронной микроскопии.

Время обращения к памяти у человека колеблется от десятых долей секунды до часов и даже месяцев. Минимальное время здесь ограничивается, по-видимому, временем срабатывания (возбуждения) нейронов. Длительные же сроки запоминания сложной информации (например, заучивания ребенком таблицы умножения, актером — большой роли и т. п.) и последующего воспо-

минания, т. е. извлечения ее из памяти, не могут быть объяснены с позиций элементарного поиска заданной ячейки в ЗУ машины.

Физиологической основой процесса запоминания является, по-видимому, не только и не столько изменение состояния нейронов как запоминающих элементов, а возникновение новых нервных связей. При возбуждении нервных клеток происходит растекание (иррадиация) возбуждения за пределы этих клеток и охват им соседних клеток. Если возбуждение происходит одновременно в различных нервных центрах, то возбуждения от них растекаются навстречу друг другу и происходит замыкание новой нервной связи, или «проторение» между ними пути. Этот механизм, названный И. П. Павловым условным рефлексом, и лежит в основе простейших явлений памяти у животных и человека.

Одна из особенностей памяти человека по сравнению с ЗУ машины заключается в том, что, как предполагает ряд ученых, определенные разделы содержания информации в мозгу не строго локализованы, т. е. нежестко привязаны к определенному участку коры, к определенной группе нейронов. Информация согласно этой точке зрения как бы диффундирует сквозь значительные объемы мозга. Этим можно объяснить, по-видимому, что прекращение деятельности некоторых групп нейронов в различных участках коры головного мозга зачастую не сказывается существенно на функциях памяти.

Интереснейшее явление, связанное с механизмом выборки информации из памяти, было обнаружено Пенфилдом. Оказывается, на височных долях поверхности больших полушарий головного мозга человека имеется так называемая интерпретационная, или толковательная, область. При воздействии на эту область слабым электрическим током человек вспоминает многое из своего, казалось бы, начисто забытого прошлого: картины, мелодии, содержание разговоров и пр.

При раздражении током различных участков коры содержание воспоминаний изменяется, но раздражение одних и тех же участков вызывает, как правило, одни и те же воспоминания. Этот факт можно истолковывать как противоречащий предположению о диффузии хранимой в памяти информации в мозгу. Однако, с другой стороны, можно полагать, что нейроны толковательной

области не являются сами хранилищами информации, а лишь играют роль ключей, открывающих выходные каналы при обращении к памяти.

Известно также явление гипертрофического обострения памяти, или гипермнезии, возникающей в результате некоторых мозговых заболеваний. При этом человек с исключительной точностью вспоминает совершенно забытые события, например может цитировать по памяти целые страницы ранее прочитанных книг.

Все сказанное о памяти человека свидетельствует об исключительной сложности и гибкости ее механизмов, но не позволяет высказать достаточно точно мнение об ее физико-химической основе. До сих пор неясно, носят ли механизмы памяти статический или динамический характер, т. е. происходит ли запоминание благодаря устойчивым изменениям тех или иных параметров нейронов (как, например, перемагничивание сердечников, опрокидывание триггеров и т. п.) или благодаря непрерывной циркуляции информации по замкнутым контурам, как в ЗУ на линиях задержки.

Одна из интересных гипотез, сформулированная Г. Б. Линковским, трактует мозг с физико-математической точки зрения как набор нелинейных автоколебательных систем с обратной связью. Соответственно этой гипотезе память человеческого мозга имеет динамически-статический характер, так как, с одной стороны, она связана с некоторыми статическими структурными изменениями в нервных клетках, а с другой — характеризуется циклическими процессами в замкнутых цепях, образованных нервными волокнами.

Весьма важное качественное отличие памяти человека от технических ЗУ состоит в методе выборки информации. В вычислительных устройствах каждое число, слово или другая часть информации фиксируется по строго упорядоченной системе в некоторой ячейке ЗУ, имеющей определенный номер или адрес. При этом процесс выборки информации из блока памяти машины никак не связан с самим содержанием информации и строго подчиняется логике вычислительного процесса.

С другой стороны, процесс выборки информации из памяти человека всегда связан с определенными ассоциациями. Так, если человеку назвать слово «деревья», то у него немедленно в связи с этим возникнут образы

ствола и листьев, их окраски, образы леса или парка и ряд других связанных по ассоциации элементов хранящейся в его мозгу весьма большой по объему информации, измеряемой зачастую сотнями или тысячами слов или чисел.

Такой механизм выборки информации не по четко заданному адресу, а по ассоциации значительно облегчает и ускоряет процесс выборки. Он может оказаться весьма полезным при построении информационно-логических машин, предназначенных, например, для выдачи сложных справок, что связано с выборкой больших количеств информации по тем или иным ее признакам.

5. АССОЦИАТИВНЫЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Основное отличие ЗУ, построенных по ассоциативному принципу, заключается в том, что поиск информации в них производится не по заданному адресу ее местонахождения, а по некоторым признакам самой информации. Так, например, если обычную номерную адресную систему можно уподобить поиску адресата по названию улицы, номеру дома и номеру квартиры, то ассоциативную систему можно сравнить с поиском адресата по его полу, возрасту, цвету волос, семейному положению и другим индивидуальным признакам, характеризующим разыскиваемого человека.

При этом следует помнить, что те или иные признаки могут оказаться общими у ряда людей и окончательный выбор должен быть обусловлен полным совпадением некоторого заданного количества признаков. В частном случае это может быть и один только признак. Например, если данное лицо достигло 18-летнего возраста (признак), то оно должно быть внесено в списки избирателей. В других случаях требуется совпадение весьма большого количества признаков, как, например, при подборе исполнителя какой-либо роли на съемках фильма.

Принцип реализации ассоциативного ЗУ может быть описан следующим образом. Пусть в ЗУ имеется m полей, каждое из которых соответствует одному из m объектов информации. В каждом поле может быть записано n слов, соответствующих признакам объектов информации. Задача отыскания объекта информации сводится

к определению того поля, в котором заданное количество введенных в ЗУ признаков совпадает с признаками, записанными в данном поле.

Подобное устройство может быть применено в диагностической машине, которая по определенному набору признаков, характеризующих состояние человеческого организма (симптомов), должна выдавать диагноз заболевания, соответствующий данной комбинации признаков. Таким же образом автоматический определитель

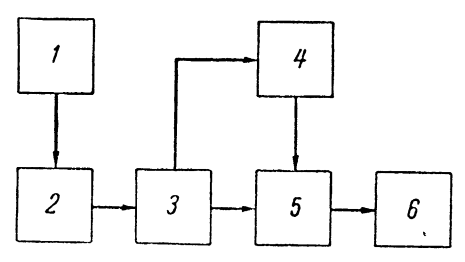


Рис. 8. Блок-схема ассоциативного ЗУ.
1 — устройство набора признаков; 2 — блок ассоциативной памяти; 3 — устройство управления; 4 — адресная система; 5 — блок сопровождающей информации; 6 — выходное устройство.

химических соединений, или геологических пород, или растений по комбинации признаков должен выдавать наименование опознаваемого объекта.

Далее задача опознания может быть дополнена задачей выдачи разнообразной сопровождающей информации. Так, диагностическая машина может, кроме диагноза, выдавать информацию о рекомендуемом режиме больного и о методах лечения; определитель химических соединений может выдавать сведения о свойствах этих соединений, технологии их получения, применения и т. п.

Один из простейших вариантов блок-схемы ассоциативного ЗУ показан на рис. 8. Признаки, по которым должен быть отыскан объект информации, вводятся тем или иным способом (например, нажатием кнопок) в устройство набора признаков, которое связано шинами с соответствующими этим признакам полями в блоке ассоциативной памяти, относящимися к определенным объектам информации.

При полном совпадении заданных признаков, достаточных для опознания объекта информации, устройство

управления обеспечивает поступление на выходное устройство названия объекта информации. Одновременно включается адресная система блока сопровождающей информации и на ее выходе получается дополнительная информация, характеризующая опознанный объект.

Поиск объекта информации в ассоциативном ЗУ требует, очевидно, выполнения следующих операций:

1. Сравнение заданного ассоциативного признака или признаков с записанными в поле объекта информации, причем последние должны сохраняться, т. е. должно быть произведено неразрушающее их считывание, предшествующее сравнению.

2. Выявление объекта информации, в процессе которого происходит совпадение заданного набора признаков с введенными в ЗУ ассоциативными признаками.

3. Неразрушающее считывание опознанного объекта и связанной с ним сопровождающей информации.

На основе описанных общих принципов построен ряд макетов ассоциативных ЗУ. В этих макетах признаки информации записываются либо на перфокартах или конденсаторных матрицах, либо на магнитных элементах (типа сердечников, трансфлюксоров или биаксов), допускающих многократное неразрушающее считывание информации.

Дальнейшие поиски в области улучшения и усложнения схем ассоциативных ЗУ при одновременном совершенствовании, уменьшении габаритов и повышении экономичности и пластичности их элементов позволят создавать технические средства хранения информации, образцом которых служит наиболее совершенный запоминающий механизм — человеческая память.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

САМООРГАНИЗАЦИЯ И КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

6. ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И КИБЕРНЕТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Самые совершенные в настоящее время кибернетические устройства весьма далеки по своим возможностям ориентировки в сложных и непредусмотренных программой ситуациях от человека и даже от многих предста-

вителей животного мира. Этот недостаток особенно существен для тех устройств, которые в процессе работы могут встречаться с различными неизвестными заранее внешними воздействиями и случайными событиями, например, при исследовании глубин океанов и недр земли, космического пространства, других планет и звездных систем. Впрочем, кибернетические устройства могут столкнуться с аналогичными непредвиденными ситуациями также при управлении процессами, в которых существенную роль играют случайные обстоятельства. К таким процессам можно отнести и управление движением различных видов транспорта, и управление некоторыми технологическими процессами, и автоматическое осуществление научных экспериментов, и ряд других задач.

Решение задач подобного типа техническими средствами требует создания машин, которые могли бы, во-первых, классифицировать информацию, поступающую в них из внешней среды, и, во-вторых, «самостоятельно» разрабатывать программы обработки информации, оценивать эффективность этих программ по конечным результатам и запоминать оптимальные программы для дальнейшего использования их в процессе своей деятельности.

Очевидно, что в такой машине связи между воспринимающими информацию элементами, элементами памяти, логическими и эффекторными (исполнительными) элементами не должны быть заранее жестко предопределены (детерминированы), а должны устанавливаться в результате взаимодействия с внешней средой. В машине должны образовываться внутренние связи, подобные цепям условных рефлексов, возникающих в живых организмах, как результат накопления жизненного опыта.

Технические системы такого рода принято называть с а м о о р г а н и з у ю щ и м и с я. Характерная особенность их заключается в самопроизвольных, без вмешательства человека, местных изменениях связей, внутренней структурной перестройке, осуществляющей приспособление к изменяющейся внешней обстановке при сохранении целостности всей системы.

Это последнее обстоятельство является существенным критерием в приведенном определении, ибо неразумно включать в понятие самоорганизации в с я к у ю п е р е-

стройку, в том числе и такую, которая заканчивается взрывом, поломкой, разрушением самой системы подобно тому, как и процесс приспособления живого организма к окружающей среде можно считать происходит лишь до тех пор, пока не происходит разрушение самого организма, не наступает смерть.

В технике автоматического управления в настоящее время довольно широко применяются некоторые типы самоорганизующихся систем. Общий признак этих систем заключается в том, что заданные значения выходных величин достигаются в них в результате автоматического поиска. Причем непременным условием эффективности поиска является наличие в таких системах обратной связи.

Особенно важное практическое значение имеют так называемые системы автоматической оптимизации, в которых автоматически осуществляется некоторое экстремальное (т. е. максимальное или оптимальное) значение того или иного регулируемого параметра. Такие системы называют также оптимальными или экстремальными.

Если оптимальные значения регулируемых параметров зависят от внешних воздействий, характер изменения которых заранее точно неизвестен, то экстремальные системы должны анализировать характер изменения входных величин и параметров системы и предсказывать их другие вероятные значения. Системы такого типа называют экстремальными системами с упреждением (предсказанием событий).

Самоорганизация системы может осуществляться методом так называемого «случайного поиска», при котором результаты оцениваются по принципу «проб и ошибок». Такие системы уже приближаются к биологическим гомеостатическим системам. Это название происходит от слова гомеостазис, означающего совокупность сложных приспособительных реакций животного организма, устраняющих или ограничивающих влияние среды на постоянство параметров организма (температуру, кровяное давление и др.).

Одна из первых технических моделей систем подобного типа — описанный в литературе гомеостат Эшби. В простейшем варианте он представлял собой устройство, состоявшее из четырех электромагнитов с подвижны-

ми сердечниками, передвигавшими при перемещении ползунки реостатов, через которые подавалось питание в обмотки электромагнитов. Положения всех элементов гомеостата были взаимно связаны, так как величина тока, протекающего по обмотке любого из электромагнитов, зависела от положений всех четырех реостатов. Положения реостатов в свою очередь зависели от положений сердечников, а значит, и от величины тока в обмотке соответствующего электромагнита. Таким образом, описываемый гомеостат представлял собой систему, содержавшую некоторое количество взаимосвязанных элементов, соединенных по принципу «каждый с каждым».

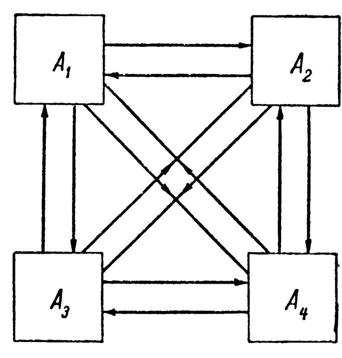


Рис. 9. Управляющая часть гомеостата Эшби.

Управляющая часть гомеостата Эшби схематически показана на рис. 9. Здесь каждый из блоков A_1, A_2, A_3 и A_4 содержит электромагнит и реостаты и имеет три выхода, и три входа, связывающие его с тремя прочими блоками.

После включения питания начинается движение всех элементов гомеостата, которое продолжается до тех пор, пока система либо сама не находит некоторое промежуточное устойчивое равновесное состояние, либо, если такое состояние найдено не будет, один из сердечников доходит до упора. При этом он воздействует на переключатель, производящий случайное изменение в схеме, и поиски равновесия возобновляются. В конечном счете схема всегда находит некоторое промежуточное равновесное состояние (одно из большого числа возможных).

Еще более гибкая самоорганизующаяся система, приближающаяся, по мнению авторов, по принципу действия к работе некоторых участков головного мозга человека, была предложена в 1954 г. учеными Фэрли и Кларком.

Эта система, изображенная схематически на рис. 10, состоит из некоторого количества (в данном случае 16) элементов, имитирующих работу нейронов. Каждый нейрон может быть соединен с любыми другими нейронами

так, что он может воспринимать поступающие от них сигналы и в свою очередь посылать им сигналы возбуждения. Все фактические соединения и эффективность соответствующих связей устанавливались случайно, например по жребию.

Кроме описанной схемы, имитирующей нейронную сеть, в системе имеется модификатор — внешнее по отношению к сети устройство, которое может изменять пороги возбуждения нейронов и связи между ними.

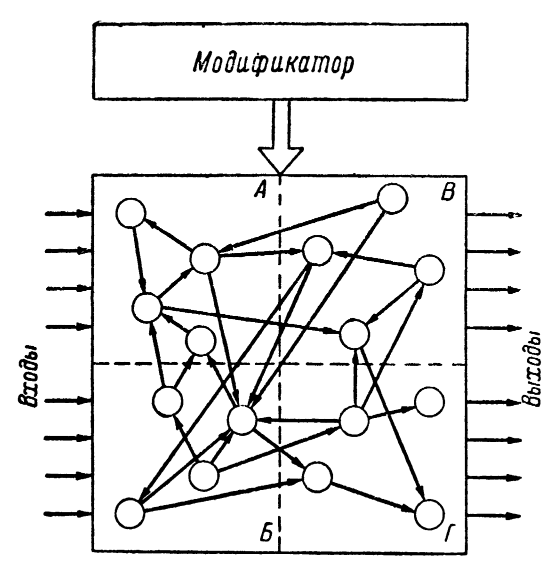


Рис 10. Модель самоорганизующейся системы (по Фэрли и Кларку).

Эксперимент самоорганизации осуществлялся в системе следующим образом. Все нейроны разделены на четыре равные группы: *А*, *Б*, *В* и *Г*. Нейроны групп *А* и *Б* могут получать сигналы со входов, а нейроны групп *В* и *Г* могут возбуждаться лишь за счет внутренних межнейронных связей и выдавать сигналы на выходы.

Внешние воздействия подаются одновременно либо на все нейроны группы *А*, либо на все нейроны группы *Б*. Перед системой ставится задача: проводить возбуждение от входов группы *А* только к выходам группы *В*, а от входов группы *Б* — только к выходам группы *Г*.

Для оценки качества выполнения системой этой задачи после каждого такта работы подсчитывается разность d_i между количеством правильно и неправильно возбужденных нейронов. Полученные за отдельные такты работы величины d_1, d_2,... алгебраически суммируются, образуя число $N=D-\Sigma d_i$, где D — некоторая наперед заданная экспериментатором величина. При идеально правильной работе системы все элементы нужной группы оказываются возбужденными, а другой группы — невозбужденными. В результате разности d_i имеют максимальную величину и $N(t)$, быстро изменяясь, достигает нулевого значения и меняет свой знак.

После этого произойдет автоматическое переключение входных сигналов с группы A на группу $Б$, число $N(t)$ опять изменит свой знак, произойдет новое переключение входов и т. д. В результате $N(t)$ будет непрерывно колебаться вблизи нуля.

Если искусственно изменить $N(t)$ в любую сторону, то оно с максимальной скоростью опять вернется к нулю.

В «плохо» организованной системе убывание значения $N(t)$ может происходить весьма медленно или это значение может даже возрастать. В этом случае организация системы производится модификатором, который в зависимости от разности абсолютных величин $N(t)$ после данного такта и $N(t-1)$ после предшествующего такта работы изменяет межнейронные связи в системе.

Если разность $[N(t)-N(t-1)]<0$, т. е. отрицательна, то модификатор усиливает эти связи, а если $[N(t)-N(t-1)]>0$, т. е. положительна, то связи ослабляются. Таким образом, достигается самоорганизация системы, позволяющая выполнять поставленную ей задачу.

Работа уже организованной системы может усложняться введением в нее условного «шума», заключающегося в хаотических изменениях внутренней структуры и порогов возбуждения элементов. Однако по истечении некоторого времени под влиянием модификатора система вновь возвращается в организованное состояние.

Дальнейшая разработка и совершенствование принципов построения и работы самоорганизующихся систем подобного типа представляют несомненный интерес для техники. Таким образом, могут быть созданы сложно организованные действующие агрегаты, которые могли бы осуществлять поддержание заданного режима ра-

боты не только при изменении внешних (входных) воздействий, но и при изменении всей внутренней структуры, в том числе при нарушении некоторых внутренних связей или даже при выходе из строя некоторой части активных элементов (ламп, транзисторов и др.).

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВНЫХ РЕФЛЕКСОВ, ОБУЧЕНИЕ И САМООБУЧЕНИЕ МАШИН

В основе взаимодействия между органами внутри живого организма, обеспечивающего его слаженную работу при изменяющихся условиях, а также поведения

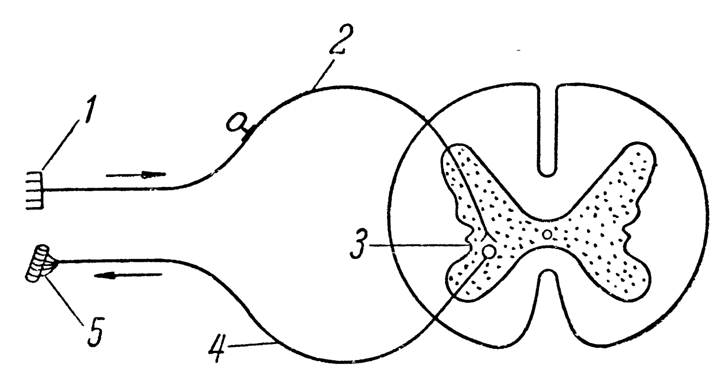


Рис. 11. Схема двухнейронной рефлекторной дуги спинномозгового рефлекса.

организма в окружающей его среде. лежат рефлексы. Рефлексами называются реакции живого организма, возникающие в виде ответа на раздражения чувствительных нервных окончаний (рецепторов). Эти реакции происходят при участии центральной нервной системы, включая ее высший отдел — кору головного мозга.

Путь, по которому осуществляется рефлекс, называется *рефлекторной дугой*. На рис. 11 показана схема простейшей двусторонней дуги спинномозгового рефлекса. Она включает в себя рецептор *1*, чувствительный (центростремительный, афферентный) нейрон *2*, проводящий импульс раздражения от рецептора к спинномозговому нервному узлу — ганглию *3*, двигательный (центробежный, эфферентный) нейрон *4*, заканчивающийся

разветвленными окончаниями *5* в двигательной мышце. Целостность рефлекторной дуги — необходимое условие осуществления рефлекса.

Рефлексы подразделяются на безусловные и условные. Первым соответствуют врожденные свойства нервной системы, поэтому безусловные рефлексы возникают каждый раз при достаточно сильном раздражении соответствующего рецептора. В основе безусловных рефлексов лежит жесткая, фиксированная, не изменяющаяся в нормальных условиях связь между рецептором и эффектором, осуществляющая строго определенную реакцию на определенные раздражения. Техническим функциональным аналогом безусловного рефлекса является любой автомат с жесткой программой, например автомат, отпускающий стакан воды или выбрасывающий тетрадку при опускании в него монеты.

Однако одни безусловные рефлексы, включая сложнейшую их форму — инстинкты, не могут осуществлять достаточную приспособляемость живого организма к непрерывно изменяющимся условиям внешней среды. Причина этого заключается в том, что безусловные рефлексы вызываются относительно небольшим количеством раздражителей из числа огромного количества внешних факторов, влияющих на организм.

Сложная задача приспособления организма к изменяющимся условиям существования достигается благодаря формированию на протяжении индивидуальной жизни организма условных рефлексов, открытых И. П. Павловым. Условные рефлексы возникают при совпадении во времени безразличных для организма раздражителей с действием раздражителей, вызывающих безусловный рефлекс. Физиологическая основа формирования условных рефлексов заключается в возникновении новых связей — образовании (замыкании) новых рефлекторных дуг в наиболее дифференцированных отделах центральной нервной системы. У высокоорганизованных живых организмов рефлекторные дуги условных рефлексов замыкаются в процессе выработки временных связей в коре головного мозга. Именно этот механизм образования разнообразных условных рефлексов и является физиологической основой формирования поведения живого организма в среде, его обучения и самообучения.

В различных странах построено значительное количество технических устройств, оформленных зачастую для занимательности в виде животных и как бы моделирующих способность приобретать и накапливать «жизненный опыт», способность «обучаться». К таким моделям относятся: «клоп» и «моль», предложенные Н. Винером, «мышь в лабиринте» К. Шеннона, целое поколение «черепах», построенное в Англии, СССР, США и других странах, «белка» Э. Беркли, «лисица» А. Дюкрока и др.

Рассмотрим более подробно схему и конструкцию «черепахи», разработанной английским физиологом Г. Уолтером и названной им «Машина спекулятрикс» (думающая машина). Эта остроумная научная игрушка представляет собой подвижное устройство на колесиках, заключенное в корпус, напоминающий по форме утюг. Черепаха снабжена аккумуляторной батареей, двумя электродвигателями, один из которых сообщает ей поступательное, а второй—вращательное движение, и двумя приспособлениями, играющими роль «чувствительных органов» — рецепторов. Один из рецепторов — фотоэлемент, реагирующий на источник света, а другой — специально сконструированный контакт, замыкающийся при встрече черепахи с препятствием или при движении ее по крутому скату. В передней части черепахи расположена контрольная лампочка, сигнализирующая включенное состояние и в то же время служащая как бы фарой.

Находясь в темноте, черепаха в поисках источника света движется по сложной траектории, обследуя в час несколько десятков квадратных метров поверхности. При встрече с препятствием она обходит тяжелые предметы и сталкивает со своего пути легкие. Она избегает движения по крутым уклонам и подъемам, стремясь выбирать для движения горизонтальную поверхность. При появлении в пределах «видимости» черепахи источника света она движется на него, однако если он слишком ярок, то «ослепленная» черепаха отворачивается и начинает поиски другого, умеренно яркого источника. При встрече с зеркалом черепаха как бы узнает себя и движется перед зеркалом по сложной траектории, то подходя к зеркалу, то удаляясь от него. Если выпустить одновременно несколько черепах, то при лобовом сближении они отворачиваются друг от друга, заходят сзади или сбоку и тогда реагируют одна на другую, как на

обычное препятствие. При появлении постороннего источника света все черепахи направляются к нему толпой, расталкивая друг друга. Если осветить «клетку» черепахи, то она заходит туда, причем если батарея нуждается в заряде, черепаха подключается к источнику зарядного

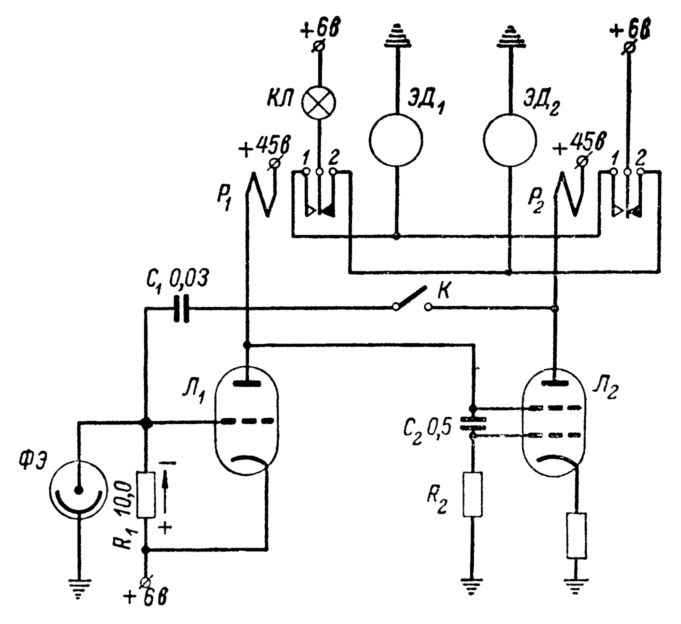


Рис. 12. Принципиальная схема черепахи.

тока и остается неподвижной до окончания заряда, после чего отключается, «гасит» за собой свет в клетке и вновь уходит на поиски.

Приведенное описание поведения черепахи может вызвать предположение об исключительной сложности ее схемы. Однако схема ее оказывается весьма простой (рис. 12), хотя простота эта была достигнута в результате долгих и настойчивых поисков наиболее целесообразного решения задачи.

В черепахе имеются две лампы (триод $Л_1$ и тетрод $Л_2$), электродвигатели $ЭД_1$ поступательного движения и $ЭД_2$ вращательного движения. Электродвигатели питаются от аккумуляторной батареи 6 *в* либо непосредственно, что соответствует их нормальной мощности и

скорости, либо через контрольную лампочку (фару) *КЛ*, что соответствует вдвое меньшей скорости. Фотоэлемент *ФЭ* укреплен на рулевой оси ведущего переднего колеса так, что он всегда направлен в сторону движения черепахи в данный момент.

Контакт *К*, расположенный в лобовой части черепахи, состоит из металлических кольца и стержня, смонтированных в кожухе с резиновой амортизацией так, что замыкание кольца со стержнем происходит как при встрече черепахи с препятствием, так и при ее сильно наклонном положении.

В анодные цепи ламп $Л_1$ и $Л_2$ включены двухпозиционные реле P_1 и P_2, срабатывающие при достаточной величине анодного тока. Сетка лампы $Л_1$ соединена с катодом через сопротивление порядка нескольких мегом, а на катод подано положительное относительно земли напряжение 6 *в*. Таким образом, при отсутствии освещенности фотоэлемента потенциал сетки относительно катода равен нулю, а при наиболее яркой освещенности он достигает максимального отрицательного значения порядка 4 *в*.

Реле P_1 удерживает якорь притянутым всегда, кроме случая яркого освещения фотоэлемента, когда вследствие большого отрицательного напряжения на сетке анодный ток снижается до малой величины. Лампа $Л_1$ и обмотка реле P_1 образуют потенциометр, с которого подается напряжение на экранирующую сетку лампы $Л_2$.

При уменьшении анодного тока лампы $Л_1$ уменьшается падение напряжения на обмотке реле P_1 и увеличивается напряжение на экранирующей сетке лампы $Л_2$. Когда фотоэлемент не освещен, это экранирующее напряжение настолько мало, что анодный ток лампы $Л_2$ недостаточен для срабатывания реле P_2. При умеренном и сильном свете оно срабатывает и замыкает контакт *1*.

Теперь можно проследить поведение черепахи в зависимости от различных внешних воздействий. В темноте якорь реле P_1 притянут и на электродвигатель $ЭД_1$ подается напряжение 6 *в* через контакт *1* этого реле и контрольную лампочку *КЛ*. Якорь реле P_2 отпущен, и электродвигатель $ЭД_2$ получает полное напряжение 6 *в*. Следовательно, черепаха будет совершать одновременно поступательное движение с половинной скоростью и вращательное движение (поиск «приманки» — источника

света) с полной скоростью. В результате сложения этих двух движений она будет двигаться по такой же траектории, как точка на ободе катящегося колеса — по циклоиде. При этом, если на фотоэлемент упадет свет от источника умеренной интенсивности, увеличится отрицательное смещение на сетке лампы $Л_1$, уменьшится ее анодный ток, увеличится напряжение на экранирующей сетке лампы $Л_2$ и сработает реле P_2, причем реле P_1 будет продолжать удерживать свой якорь. Питание электродвигателя $ЭД_2$ прервется, и поиск прекратится, а на электродвигатель $ЭД_1$ будет подано полное напряжение 6 *в*, благодаря чему черепаха на полной скорости пойдет в направлении источника света. При этом лампочка *КЛ* погаснет, так как она будет шунтирована контактом *1* реле P_2.

При очень ярком («ослепляющем») свете реле P_1 отпускает, а реле P_2 продолжает удерживать якорь. Следовательно, через контакт *2* реле P_1 и лампочку *КЛ* будет подано напряжение на электродвигатель $ЭД_2$ и черепаха начнет «отворачиваться» от источника света, продолжая двигаться, так как электродвигатель $ЭД_1$ получает питание через контакт *1* реле P_2.

Если черепаха «видит» свое отражение в зеркале, т. е. если фотоэлемент воспримет отраженный зеркалом свет фары *КЛ*, то черепаха прекратит поиск и направится по прямой линии к зеркалу, как к обычному источнику света. Но так как фара при этом погаснет, а следовательно, исчезнет и отраженный свет, то черепаха начнет двигаться по циклоиде, вновь зажжет фару и будет продолжать двигаться по циклоиде, пока опять не «увидит» свое отражение в зеркале.

При встрече двух черепах каждая из них начинает двигаться на свет фары другой, но так как при этом фары сразу же погаснут, то дальше черепахи начнут поиски, как в темноте, т. е. разойдутся. При постороннем источнике света каждая из черепах будет стремиться к нему с потушенной фарой, а при взаимных столкновениях они будут вести себя так же, как и при столкновении с обычными препятствиями.

При столкновении с препятствием или же при сильном наклоне поверхности происходит замыкание контактом *К* цепи обратной связи между анодом лампы $Л_2$ и сеткой лампы $Л_1$. Благодаря этому образуется простей-

шая схема мультивибратора, состоящая из ламп $Л_1$ и $Л_2$, конденсаторов C_1 и C_2, сопротивлений R_1 и R_2 и обмоток реле P_1 и P_2. При работе мультивибратора реле P_1 и P_2 будут попеременно притягивать и отпускать свои якоря. Элементы мультивибратора несимметричны и подобраны так, что время, в течение которого притянут якорь реле P_1, вдвое меньше времени притяжения якоря реле P_2. Преодоление или обход препятствия происходит следующим образом.

В течение короткого промежутка времени (срабатывание реле P_1 и отпускание реле P_2) происходит интенсивное вращение черепахи и слабое толкание, а затем в течение вдвое более длительного промежутка времени (срабатывание реле P_2 и отпускание реле P_1) — медленное вращение и интенсивное толкание и т. д. Периодичность этого процесса зависит от параметров цепи обратной связи, в которую наряду с сопротивлением R_1 входит параллельно включенный фотоэлемент *ФЭ*. Таким образом, при освещении фотоэлемента общее активное сопротивление цепи обратной связи, а значит, и постоянная времени уменьшаются и обход препятствия при «манящем свете» происходит быстрее.

Включение света в специальной «клетке» привлекает черепаху так же, как и обычный источник света, но когда она попадает в клетку, происходит включение на заряд батареи, причем электродвигатели отключаются специальным реле, не показанным на схеме. В конце заряда вследствие уменьшения зарядного тока реле отпускает, включаются электродвигатели, в клетке автоматически гаснет свет и черепаха вновь выходит на поиски «приманки».

Описанная схема моделирует ряд безусловных рефлексов, механизм которых обусловлен неизменной конструкцией и схемой черепахи. Дальнейшее усложнение ее схемы позволило моделировать и процессы формирования условных рефлексов. При этом в качестве безусловного раздражителя использовался свет, воспринимавшийся фотоэлементом, а в качестве условного сопутствующего раздражителя — звук, воспринимавшийся микрофоном.

Такая модель ведет себя следующим образом. Она всегда приходит в движение под действием света и движется при одновременном воздействии света и звука,

но никак не реагирует на один только звук. Однако если повторить, скажем, десять опытов, одновременно «показывая» черепахе свет и издавая звук, то после этого черепаха будет приходить в движение уже и при одном звуке. Но если затем в течение определенного времени или определенного количества опытов не подкреплять звук светом, то образовавшаяся временная связь исчезнет, «условный» рефлекс угаснет подобно тому, как если

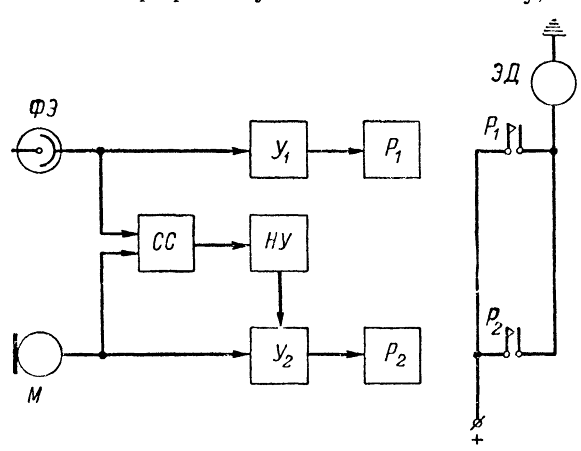


Рис. 13. Скелетная схема моделирования условного рефлекса.

только показывать собаке свет, не подкрепляя этот условный раздражитель пищей, то ранее выработанный по И. П. Павлову условный рефлекс на свет у нее угаснет и реакция в виде отделения слюны при показе света прекратится.

Не рассматривая подробно принципиальную схему этой модели, ограничимся описанием упрощенной скелетной схемы (рис. 13), по которой можно составить общее представление о принципе моделирования условного рефлекса.

Рецепторами модели служат фотоэлемент *ФЭ* и микрофон *М*, напряжения от которых подводятся к усилителям $У_1$ и $У_2$. На выходе усилителей включены реле $Р_1$ и $Р_2$ так, что при срабатывании любого из них замыкается цепь питания электродвигателя *ЭД*. При освещении фотоэлемента в результате усиления фототоков усили-

телем $У_1$ срабатывает реле P_1 и черепаха начинает двигаться. Однако при появлении звука черепаха остается неподвижной, так как усилитель $У_2$ нормально не работает, вследствие того что на сетки его ламп подано запирающее отрицательное смещение.

При одновременном воздействии света и звука черепаха также приходит в движение благодаря срабатыванию реле P_1. Однако при этом токи от фотоэлемента и микрофона поступают также в схему совпадения *СС*, которая в результате каждого случая совпадения света и звука выдает импульс тока в накопительное устройство *НУ* памяти, например постепенно заряжающийся конденсатор. Когда в результате, скажем, десятикратного повторения совпадений света и звука напряжение на конденсаторе достигнет определенной величины, оно отопрет лампы усилителя $У_2$, после чего черепаху можно считать «натренированной»: реле P_2 будет срабатывать и при воздействии одного только звука, и черепаха будет приходить в движение.

В схему можно ввести дополнительное реле, которое через большое сопротивление каждый раз при наличии только звука будет несколько разряжать конденсатор. Таким образом, после нескольких опытов движения черепахи от звука (условного раздражителя) без подкрепления светом (безусловным раздражителем) образовавшаяся временная связь разрушится и черепаха перестанет реагировать на один только звук.

Конечно, механизмы образования условных рефлексов в живых организмах неизмеримо более сложны и гибки, но инженеры могут разработать и предложить физиологам более сложные и более совершенные схемы, из которых можно выбрать схемы, наиболее соответствующие реальным процессам в живом организме.

Описанная черепаха, как и другие ранее создававшиеся устройства, моделирует рефлексы, заранее предопределенные конструктором. Однако более совершенный автомат должен характеризоваться известной «свободой обучения», т. е. он должен обладать возможностью выбора той или иной нужной связи из некоторого множества связей, допускаемых его схемой.

Модель подобного автомата, разработанная в Институте психиатрии АМН СССР, представлена матрицей (рис. 14), состоящей из так называемых «центральных»

нервных клеток. Каждая такая клетка имеет три входа и один выход, на котором возникает сигнал возбуждения, если произошло несколько одновременных возбуждений всех трех входов.

Входы P_1, P_2, .., P_n имитируют рецепторные нейроны, возбуждаемые под влиянием внешних раздражителей. Сигналы на входах $Э_1$, $Э_2$, ..., $Э_m$ соответствуют возбуждению эффекторных нейронов. Наконец, на вход $П$ по-

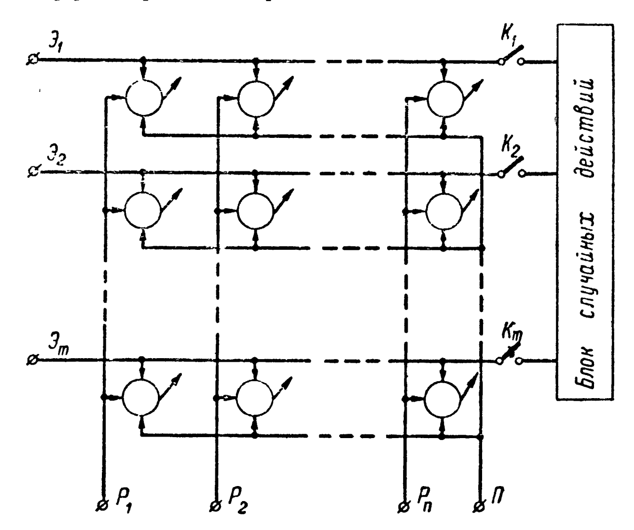


Рис. 14. Блок-схема обучающейся матрицы из центральных клеток.

дается сигнал подкрепления, фиксирующий возникающие в схеме случайные связи, если они оказываются «полезными» для функционирования системы. В лабораторном макете подобного устройства критерий полезности определяется оператором.

Процесс обучения автомата происходит следующим образом. На рецепторные входы матрицы подаются сигналы раздражения, и в то же самое время блок случайных действий, имитирующий срабатывание эффекторных нейронов, поочередно подает через замкнутые контакты K_1, K_2, ..., K_m сигналы возбуждения на шины $Э_1$, $Э_2$, ..., $Э_m$. Наконец, в некоторые моменты времени подаются сигналы подкрепления, поступающие на все центральные клетки матрицы. Очевидно, что в каждый данный мо-

мент времени все три входа окажутся возбужденными лишь у какой-то одной из клеток. В результате нескольких подобных случайных возбуждений одной и той же центральной клетки в ней создается возбуждение на выходе. Это и соответствует выработке условного рефлекса, механизм которого оказывается локализованным в данной клетке.

Дальнейшее обучение позволяет выработать (на те же или другие раздражения) другие условные рефлексы, механизмы которых будут локализованы в других центральных клетках. После окончания обучения схемы блок случайных действий отключается от нее путем размыкания контактов K_1, $K_2, ..., K_m$, но образовавшиеся условные рефлексы продолжают определять действия автомата. Схема центральных клеток может быть построена таким образом, что возникшее в ней возбуждение на выходе сохраняется лишь при условии периодического подкрепления соответствующих входных возбуждений.

Более сложная задача состоит в моделировании рефлексов, когда прежде всего должен быть выработан условный рефлекс на некоторое раздражение P_i, подкрепляемое сигналом $П$, затем на раздражение P_k, подкрепляемое раздражением P_i, затем на раздражение P_l, подкрепляемое раздражением P_k, и т. д. В подобной системе необходимо реализовать процессы различения раздражений во времени, что позволяет создавать автоматы, моделирующие ряд логически-последовательных операций, направленных к достижению некоторой полезной цели.

Разработка принципиальных схем центральных нервных клеток и отдельных узлов такого автомата, а также постройка самого автомата, реагирующего на четыре внешних раздражителя, были осуществлены Студенческим конструкторским бюро кибернетики Московского энергетического института.

Автомат представляет собой устройство, построенное на 100 электронных лампах, полупроводниковых диодах и электромеханических реле. Автомат демонстрировался в действии на ВДНХ.

Дальнейшие разработки и совершенствование могут привести к созданию кибернетических машин такого типа, которые будут подобно живому организму в процессе работы вырабатывать для себя программу действий в виде цепи условных рефлексов, осуществляющей

наилучший способ достижения поставленной перед ними конечной цели. Такие самоорганизующиеся системы могут оказаться особенно полезными для управления некоторыми мало изученными производственными процессами, устройствами для космических исследований и т. п.

8. НАДЕЖНОСТЬ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Непрерывное расширение диапазона задач, поручаемых кибернетическим машинам, связано с усложнением этих машин и быстрым увеличением количества их элементов. Это в свою очередь значительно усложняет создание достаточно надежных кибернетических систем.

Согласно одному из многочисленных определений надежностью устройства называют вероятность того, что в заданном интервале времени не произойдет ни одного отказа в работе.

При обычном принципе построения электронных схем они прекращают работать при выходе из строя хотя бы одного существенного элемента: лампы, транзистора, трансформатора, конденсатора и др. Пусть каждый из n видов элементов, входящих в данное устройство, характеризуется вероятностью q_i безотказной работы в течение некоторого заданного срока. Пусть далее количество элементов каждого вида в устройстве равно m_i. Тогда надежность, т. е. вероятность Q исправной работы всего устройства в целом в течение этого срока, определится произведением:

$$Q = q_1^{m_1} q_2^{m_2} \dots q_n^{m_n} = \prod_{i=1}^{n} q_i^{mi}.$$

Таким образом, с увеличением количества элементов при неизменной величине их надежности надежность устройства может стать настолько малой, что использование данного устройства может оказаться практически нецелесообразным.

Если первые радиоэлектронные схемы содержали несколько штук или максимум несколько десятков ламп, то сейчас количество ламп или транзисторов в них уже достигает тысяч и десятков тысяч. Например, цифровая вычислительная машина БЭСМ имеет 5 000 ламп, а вычислительная машина AN/FSQ-7, построенная фирмой

ИБМ (США) для работы в системе противовоздушной обороны, содержит около 58 000 ламп.

Кроме того, на каждую лампу в электронных схемах приходится в среднем от 5 до 16 конденсаторов и примерно столько же сопротивлений. Наконец, оперативные запоминающие устройства современных машин зачастую содержат сотни тысяч и даже миллионы запоминающих элементов — ферритовых сердечников.

Если даже пренебречь возможностью выхода из строя всех прочих деталей и считаться только с отказами в работе из-за неисправностей ламп и далее задаться вероятностью надежной работы лампы в течение 1 000 *ч* ($q=0{,}999$), то надежность кибернетической машины, содержащей 58 000 ламп, будет, очевидно, равна $Q=$ $=0{,}999^{58\,000}\approx 10^{-23}$. Таким образом, практически представляется совершенно невероятным, чтобы эта машина могла безотказно проработать 100 или хотя бы даже 10 *ч* без применения каких-либо дополнительных мер. В частности, в упомянутой машине все основные блоки — запоминающее, арифметическое и выводное устройства полностью дублированы. Однако подобное дублирование устройств или отдельных крупных блоков — отнюдь не наилучшее решение задачи. В самом деле, если каждый из дублирующих друг друга блоков содержит очень большое количество деталей, причем выход из строя одной из деталей выводит из строя весь блок, то даже несколько взаимно дублирующих блоков не обеспечат надежности работы всего устройства в целом.

Между тем в центральной нервной системе живых организмов, состоящей из миллиардов нейронов, выход из строя целых участков системы, включающих многие тысячи нейронов, приводит зачастую лишь к временному ухудшению соответствующей функции, которая затем восстанавливается. Можно указать, например, на опыты Лешли с ориентировкой крыс в лабиринте. При этих опытах удаление у крыс значительной части мозгового вещества лишь частично нарушало способность животных к ориентировке. Причина восстановления функций заключается, как правило, не в регенерации нервного вещества, а в выработке функции заново в сохранившихся участках нервных структур.

Такое свойство нервной системы, очевидно, может достигаться только в результате значительных резервных

возможностей живых организмов, так называемой избыточности их организации. Избыточность конструкции живых организмов обеспечивает возможность их самоорганизации в процессе обучения и достаточную надежность системы.

Следует при этом подчеркнуть, что каждый отдельно взятый нейрон представляет собой элемент, характеризующийся значительно меньшей надежностью, чем, скажем, электромеханическое реле, лампа или транзистор. В то же время сложная нейронная структура благодаря исключительно целесообразной избыточности организации, выражающейся в множественности резервных элементов и связей между ними, может в целом действовать с весьма высокой степенью надежности.

Таким образом, живые организмы представляют собой высоконадежные кибернетические системы, построенные из мало надежных элементов. Начало математической разработки проблем создания подобных систем было положено крупнейшим математиком Дж. Нейманом. Он показал, что, комбинируя определенным образом ненадежные логические элементы типа «штриха Шеффера» [1], можно получить схему, действующую, как штрих Шеффера высокой надежности.

Для этой цели можно использовать в схемах дополнительные (избыточные) элементы, так что вероятность искажения заданной функции окажется незначительной, несмотря на случайные отказы отдельных элементов. Избыточные элементы включают в себя как «исполнительные» органы, выполняющие некоторые логические функции и функции задержки, так и специальные «восстанавливающие» органы, способствующие устранению возникающих неисправностей.

Передача информации внутри описанной Нейманом системы происходит по пучкам дублирующих друг друга цепей. При этом система организуется так, что причиной несрабатывания всего устройства может быть лишь

---

[1] Органом Шеффера (или штрихом Шеффера) называют логический элемент с двумя двоичными входами и одним выходом, выполняющий логическую функцию двух переменных: $\overline{AБ}$ (альтернативное отрицание). Эта функция читается не (*А* и *Б*) и означает, что на выходе такого элемента получится сигнал, если на входе *А* или на входе *Б* сигнал равен нулю или на обоих входах сигналы равны нулю.

несрабатывание большого числа элементов, а не отдельного элемента или небольшого количества их. При достаточно большом количестве линий в каждом пучке вероятность несрабатывания устройства может быть принципиально сделана сколь угодно малой.

Дальнейшее развитие идей Неймана привело к разработке теории надежных схем из ненадежных реле. Метод Неймана был применим лишь при определенной, достаточно высокой надежности логических элементов при возможности ошибки не более $^1/_6$. Позднее были разработаны вопросы теории надежных схем из ненадежных реле, которые позволяют в принципе создавать схемы с любой заданной надежностью из элементов с любой вероятностью ошибки. Естественно, что для этого необходимо повышение количества элементов, т. е. увеличение избыточности конструкции.

Важнейший фактор устойчивости и надежности структур живых организмов заключается также в их непрерывном обновлении благодаря процессам обмена веществ, вследствие чего происходят постоянное разрушение и созидание. Современная наука и техника еще весьма далеки от создания подобных искусственных самообновляющихся технических устройств.

Для практической реализации многократной избыточности необходима разработка достаточно миниатюрных и экономичных элементов релейного типа. Применение принципов избыточности организации, свойственных живым организмам, при использовании достижений микроминиатюризации элементов и схем позволит создавать новые исключительно гибкие и надежные кибернетические системы, прототипом которых могут служить нервная система и ее совершеннейший орган — человеческий мозг.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ
АНАЛИЗАТОРЫ И ПЕРЦЕПТРОНЫ

9. АНАЛИЗАТОРЫ ЖИВОТНЫХ И ЧЕЛОВЕКА

Анализаторы, или органы чувств, представляют собой органы живого организма, предназначенные для поступления в них из внешней среды разнообразной информации об окружающем материальном мире. Эти органы,

по определению В. И. Ленина, служат как бы «окнами», через которые внешний мир проникает в сознание человека.

Классическое представление об органах чувств, восходящее еще к эпохе древнегреческой культуры, различает пять основных видов чувств: зрение, слух, обоняние, осязание и вкус. При этом важнейший для человека орган чувств — зрительный анализатор. Через него, как показали исследования, человек воспринимает до 80—85% всей внешней информации.

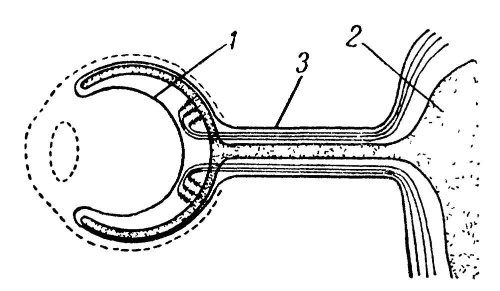


Рис. 15. Схематическое изображение зрительного анализатора.

1 — сетчатка; *2* — зрительный нерв; *3* — мозг.

Современная классификация насчитывает значительно большее количество видов чувств. Так, в настоящее время различают чувства боли, тепла и холода, равновесия, перемещения в пространстве, голода, жажды и ряд других.

Анализаторы представляют собой трехзвенные системы, включающие следующие три ступени. Первое звено анализаторной цепи — приемник или рецептор, обращенный к внешней (иногда и к внутренней) среде и предназначенный для приема сигналов-раздражителей и переработки (перекодирования) этих сигналов в нервные импульсы. Вторым звеном анализатора является нервный пучок, предназначенный для проведения нервных импульсов от рецептора к третьему звену — мозговому центру, в котором и происходит переработка воспринятых сигналов в ощущения.

В качестве примера наиболее важного для человека анализатора рассмотрим зрительный анализатор (рис. 15). Рецептором зрительных ощущений служит

глаз или, точнее, специальные чувствительные клетки его сетчатки. Общее количество этих клеток у человека составляет около 130 млн., из них так называемых палочек — 123 млн. и колбочек — 7 млн. Другие части глаза — зрачок, хрусталик, мышцы и т. п. — служат лишь вспомогательными органами оптической системы. Они обеспечивают преломление, фокусировку и диафрагмирование для получения проекции резкого изображения на сетчатке, а не впереди или позади нее.

В рецепторных клетках под действием света возникает возбуждение, которое по нервным волокнам передается к мозговому или центральному концу зрительного анализатора, расположенного в коре затылочной доли мозга. Общее количество волокон в зрительном нерве около 1 млн., т. е. в среднем одно волокно проводит возбуждения от 130 фоторецепторов.

Отметим некоторые интересные с точки зрения инженера свойства и характеристики зрительного анализатора человека.

Прежде всего поражает колоссальный диапазон чувствительности сетчатки. Энергия, достаточная для получения светового ощущения, составляет 5—14 квантов. Следовательно, чувствительность зрительного анализатора доведена почти до возможного предела, если учесть, что минимально возможное количество световой энергии равно 1 кванту. С другой стороны, глаз способен выдерживать воздействие и весьма больших световых потоков, как, например, при взгляде на солнце или на дугу электросварки.

Важное свойство органа зрения, обусловливающее расширение его информационных возможностей, заключается в его способности к различению длин волн световых колебаний в диапазоне от 350 до 850 *ммк*. Субъективно световые колебания разных частот воспринимаются человеком как различные цвета, причем природа механизма цветового зрения до сих пор еще не получила удовлетворительного объяснения.

Глаз человека охватывает весьма большое поле зрения, т. е. он представляет собой широкоугольную оптическую систему. Однако ясность видения в различных частях видимого поля весьма различна. Мы плохо видим элементы изображения, расположенные по краям этого поля, и наиболее четко — расположенные посре-

дине поля, проектирующиеся на так называемую центральную ямку сетчатки. Центральная ямка имеет диаметр около 1,4 *мм*, что соответствует углу зрения около 1,3°. Для наглядности представления укажем, что конус с таким углом у вершины при высоте 1 *м* будет иметь основание в виде круга диаметром около 2 *см*.

Таким образом, бо́льшая часть сетчатки используется в глазу человека лишь для общей ориентировки, а для ясного ви́дения глаз должен быть направлен на рассматриваемые детали изображения так, чтобы они попали в зону, заключающуюся в пределах очень узкого угла зрения.

Как уже указывалось ранее, для глаза характерно явление адаптации, т. е. привыкания к статичному раздражению. При этом ви́дение неподвижных предметов обеспечивается мелкими колебательными движениями глаза, которые происходят непрерывно даже в те моменты, когда наблюдатель стремится фиксировать взгляд в какой-либо неподвижной точке. Частоты этих колебаний находятся в пределах от 1 до 150 *гц*.

Такие движения глаза происходят по всем направлениям и благодаря им глазом выделяются те участки изображения, которые содержат основную информацию о рассматриваемом объекте.

Кроме того, при рассматривании крупных объектов оба глаза строго синхронно совершают с большой угловой скоростью (до 400° в секунду) еще скачки от одной точки изображения к другой. При этом, если пренебречь мелкими движениями, время рассматривания объекта распределяется следующим образом. На скачки затрачивается около 3% всего времени, а остальные 97% взгляд оказывается фиксированным на тех или иных наиболее ярких и важных элементах изображения.

При рассматривании движущихся объектов глаза передвигаются с угловой скоростью, равной угловой скорости движения объекта относительно наблюдателя. Такое непрерывное во времени слежение за объектом перемежается периодическими скачкообразными движениями глаз, имеющими своей целью корректировку ошибок слежения.

Пропускную способность зрительного анализатора человека на основании многочисленных опытов можно оценить величиной порядка 10—50 *дв. ед./сек.*

Не вдаваясь в дальнейшие подробности сложнейшего механизма восприятия зрительных образов, отметим лишь, что система зрительного анализатора очень хорошо приспособлена для восприятия, передачи и переработки информации. В ней используются методы дискретного двоичного кодирования информации, что обеспечивает высокую помехоустойчивость. Для обнаружения сигналов в зрительной системе используются статистические методы, которые только начинают применяться в настоящее время в наиболее совершенных технических системах передачи информации.

Другим весьма важным органом восприятия информации у животных и человека служит слуховой анализатор.

Частотный диапазон слухового анализатора человека заключается в пределах от 16 до 13 000 *гц* (у пожилого человека) и до 22 000 *гц* (у ребенка). Наибольшей чувствительностью человеческое ухо обладает в области частот 1 000—4 000 *гц*.

Об исключительно высокой чувствительности слухового анализатора можно судить по следующим цифрам. Люди с острым слухом воспринимают звук при величине звукового давления в слуховом проходе около 0,0001 *дин/см*^{2}. Такому давлению соответствует перемещение элементов улитки уха на величину порядка 10^{-11} *см* (в 1 000 раз меньше диаметра атома водорода).

В то же время слуховое восприятие оказывается еще возможным и при увеличении звукового давления до 200—2 000 *дин/см*^{2}, когда возникает болевой порог.

Различительная способность человеческого уха также весьма велика. Так, люди с хорошо развитым слухом могут отличить тон в 1 000 *гц* от тона в 1 001 *гц*.

Важное свойство слухового анализатора заключается в так называемом бинауральном эффекте, заключающемся в способности человека с точностью до 2—3° определять направление приходящего звука. Это свойство обусловлено разностью интенсивности и фазы звуковых волн, достигающих обоих ушей.

Не останавливаясь на работе прочих органов чувств, представляющих собой также весьма сложные и тонкие системы, уже из сказанного об анализаторах зрения и слуха можно сделать вывод об их исключительно высокой и совершенной организации. Напомним еще об ин-

тереснейших способах ориентировки в пространстве некоторых животных (дельфинов, летучих мышей) и насекомых (водяных жуков) методами эхо-локации. Наконец, ожидают своего решения и не вскрыты до сих пор механизмы ориентировки перелетных птиц, мигрирующих рыб, пчел и пр.

Поэтому совершенно естественно стремление ученых наделить кибернетические машины, в которых реализуются сложнейшие программы переработки информации, значительно более гибкими и совершенными устройствами для восприятия информации из внешней среды, хотя бы в некоторой степени сравнимыми по своим способностям к распознаванию с анализаторами высших животных и человека.

10. ПЕРЦЕПТРОНЫ

В результате разработки технических моделей биологических анализаторов было создано несколько экспериментальных образцов так называемых **перцептронов** (от слова перцепция — восприятие), предназначенных для автоматического восприятия и опознания визуальных образов. В принципе возможно также создание перцептронов, моделирующих органы слуха, обоняния, осязания и других чувств. В частности, разработаны кибернетические автоматы, опознающие произносимые вслух названия цифр.

Практический интерес представляет собой разработка перцептронов, способных распознавать объекты, сигналы от которых недоступны непосредственному восприятию человека. К таким объектам можно отнести, например, источники инфракрасного излучения, источники радиочастотных или ультразвуковых колебаний и др.

Применение перцептронов может значительно упростить процесс ввода информации в машину, делая возможным автоматическое считывание машиной исходной информации и инструкций об ее обработке с печатного или рукописного текста или даже ввод в машину устной информации и команд вместо предварительной заготовки перфокарт или перфолент.

Кибернетические машины, снабженные заменителями анализаторов — перцептронами, будут представлять собой высший класс автоматов, которые могут в условиях автономного существования наиболее целесообразно вза-

имодействовать с внешней средой и другими кибернетическими автоматами.

Наконец, создание моделей анализаторов открывает в перспективе пути протезирования утраченных человеком органов чувств.

Остановимся несколько подробнее на наиболее разработанной задаче автоматического опознания визуальных образов, реализуемой при помощи так называемых квазизрительных перцептронов.

Опознание какого-либо объекта может быть определено как формирование некоторого сигнала или кода, однозначно соответствующего опознаваемому объекту, независимо от изоморфных преобразований этого объекта. Под изоморфными преобразованиями понимаются такие видоизменения объекта, которые не приводят к уничтожению его основной сути (с точки зрения опознающей системы). Иными словами, при изоморфных преобразованиях не должны быть уничтожены те основные признаки, по которым опознается объект.

Простейшие изоморфные преобразования заключаются в изменении масштаба изображения, его яркости, ориентации и местоположения относительно других объектов или рецептора. Подобные преобразования заглавной буквы «А» иллюстрируются верхним рядом на рис. 16. Более сложные преобразования того же изображения показаны в нижнем ряду на рис. 16. Здесь нарушения непрерывности линий буквы или некоторые искажения ее деталей могут сделать невозможным опознание ее автоматом, хотя человек по-прежнему восприлет все эти начертания как букву «А». Таким образом, «с точки зрения» автомата некоторые из этих преобразований могут оказаться неизоморфными, тогда как человек воспринимает их как изоморфные.

Автоматическое опознание визуальных образов (букв, цифр, силуэтов кораблей или летательных аппаратов и т. п.) может решаться двумя основными путями.

В одном случае, если объект, подлежащий опознанию, может быть точно описан аналитически, т. е. если ему могут быть сопоставлены некоторые определенные математические соотношения, возможен детерминированный (строго определенный правилами, программой действий) процесс опознания. В этом случае для опознания используются предпрограммированные пер-

цептроны, т. е. автоматы, состояния которых однозначно определяются программой, заложенной в них до начала процесса опознания.

Однако в ряде случаев достаточно точное логическое описание изображения представляет значительные трудности, а иногда оказывается и невозможным. В таких случаях для опознания могут быть использованы самоорганизующиеся перцептроны, которые как бы «обучаются», изменяя в процессе работы свою програм-

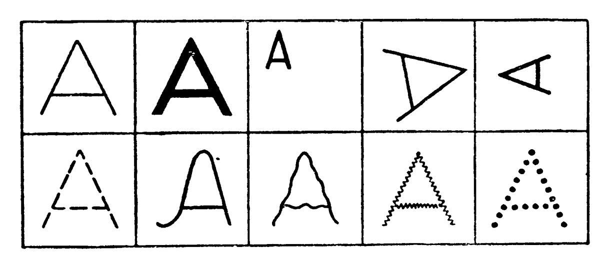


Рис 16. Примеры изоморфных преобразований.

му и устанавливая и запоминая при этом основные признаки объекта, по которым он может наиболее эффективно опознаваться.

Наиболее примитивное решение задачи опознания сводится к простому сравнению объекта, например опознаваемых печатных букв или цифр, с некоторым образцом (шаблоном, трафаретом).

Более совершенны и гибки методы считывания знаков с применением принципов развертки изображения, для которой могут применяться как электромеханические (диски с прорезями), так и электронные (электронно-лучевые трубки) устройства. При этом могут применяться развертки по горизонтали, по вертикали, по спирали, по радиусу и другие. В результате на выходе развертывающей части устройства получаются электрические сигналы, изменяющиеся во времени непрерывно или представляющие собой некоторые дискретные коды, соответствующие опознаваемым объектам.

Дальнейший процесс опознания заключается в сличении полученных от развертывающего устройства функций или кодов с соответствующими функциями или кодами, хранящимися в запоминающем устройстве предпро-

граммированного перцептрона, и установлении меры их взаимного соответствия. При этом в результате изоморфных преобразований опознаваемого изображения могут произойти такие изменения формы и структуры сигнала на выходе развертывающего устройства, которые сделают практически невозможным опознание объекта. Например, при строчной развертке при повороте на значительный угол опознаваемой буквы или цифры сигнал на выходе неузнаваемо изменяется. Резко изменяется также расстояние между импульсами, соответствующими тем или иным элементам опознаваемой буквы, при изменении масштаба этой буквы и т. п. Все это значительно увеличивает трудности машинного опознавания, хотя не представляет почти никаких дополнительных трудностей при опознавании объектов человеком.

Следовательно, целесообразно попытаться разработать иные методы машинного опознавания, которые позволили бы автомату воспринимать основные характеристики начертания букв или цифр независимо от их размеров, ориентации и других изоморфных преобразований.

Один из таких методов, носящий название квазитопологического, может быть упрощенно описан следующим образом. Представим себе устройство, позволяющее совершать последовательный обход всех элементов буквы «А» и фиксировать на ней точки обрыва линии кодом 1 и точки, где сходятся три или более линий, — кодом 0.

Примем далее следующий метод обхода. Начав его, например, с нижней левой точки *а* (рис. 17,*а*), будем двигаться до точки разветвления (в данном случае до точки *б*), от которой нужно продолжать обход по ближайшему справа пути до точки *г* и далее до точки *д*. При попадании в точку, где линия обрывается (в данном случае точка *д*), нужно повернуть обратно и по тем же правилам продолжать движение до возвращения в исходную точку *а*.

Таким образом, при обходе буквы *А*, изображенной на рис. 17,*а*, будут пройдены точки *а, б, г, д, г, в, б, а*. Это в соответствии с принятыми нами обозначениями характерных точек даст код: 1001001 (точка *в*, в которой нет ни обрыва, ни разветвления линий, не рассматривается как характерная).

Тот же самый код будет получен и при ином начертании буквы «А», изображенном на рис. 17,*б*. Очевидно, что при поворотах или изменении масштаба изображения буквы описанный способ обхода будет давать один и тот же код; что значительно облегчает процесс опознавания. Тот же код может быть получен и при некоторых изменениях способа начертания буквы, как, например, закруглении острых углов, замене прямых линий кривыми и т. п.

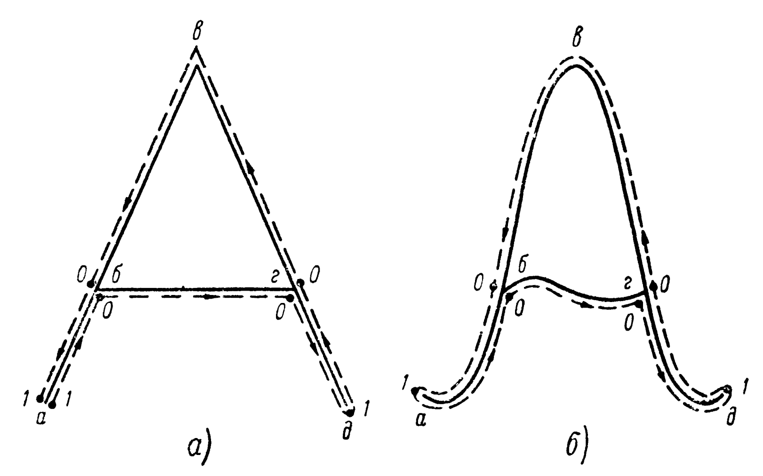


Рис 17. Получение кода буквы „А" методом обхода ее изображения (квазитопологическим методом).

Предложен также ряд других способов подготовки (препарирования) изображения и собственно процесса опознавания, описанных в специальной литературе по этому вопросу. Для опознавания более сложных изображений, характеризующихся не только контурами, но и их заполнением, яркостью, цветностью, объемностью и т. п., требуются значительно более сложные методы развертки или иного препарирования изображений. При этом процесс опознания настолько усложняется, что жесткое программирование его становится практически невозможным.

Наиболее универсальный путь преодоления этих трудностей заключается, по-видимому, в способе, подсказываемом органической природой и заключающемся в создании самоорганизующихся опознающих систем.

Достаточно строго разработанной теории таких систем пока еще не существует, а практическая реализация самоорганизующихся перцептронов, описанная в журналах США, ограничена следующими тремя моделями: артрон фирмы Мелпар, пандемониум Селфриджа и перцептрон «Марк-I» Розенблатта. Приведем некоторые сведения о последней модели как наиболее полно описанной в литературе.

Перцептрон «Марк-I» основан на теории статистического различения. Перцептрон способен после некоторого периода «обучения» воспринимать, классифицировать и символически отображать объекты окружающей среды без участия человека-оператора. Основная отличительная черта перцептрона состоит в том, что для его работы не требуется предварительное точное логико-математическое описание всех внутренних соединений и переключений.

Принцип действия перцептрона поясняется схемой, приведенной на рис. 18. На этой предельно упрощенной схеме показана модель перцептрона с тремя рецепторами и восемью ассоциирующими и одной эффекторной ячейками. Рецепторная ячейка включает в себя фотоэлемент и имеет два выхода. При освещении ячейки на одном из ее выходов появляется положительный, а на другом — отрицательный сигнал.

Соединения между рецепторными и ассоциирующими ячейками носят совершенно случайный, беспорядочный характер. Однако они фиксированы при изготовлении перцептрона и в процессе работы не меняются.

Если алгебраическая сумма сигналов, поступающих в какую-либо ассоциирующую ячейку от рецепторных ячеек, положительна и превышает некоторую пороговую величину (в данном простейшем случае — положительное напряжение, вырабатываемое одной рецепторной ячейкой), то соответствующая ассоциирующая ячейка выдает сигнал в эффекторную (реагирующую) ячейку. Суммарное значение сигналов, поступающих в эффекторную ячейку, сравнивается в ней с заранее установленным пороговым значением, в результате чего эффекторная ячейка срабатывает или не срабатывает.

При этом может произойти ложное срабатывание (а это, учитывая случайный характер монтажных соединений, вполне возможно), т. е. эффекторная ячейка мо-

жет сработать, когда предъявленный перцептрону объект не должен опознаваться. Тогда оператор, занимающийся обучением перцептрона, изменяет характеристические параметры ассоциирующих ячеек, добиваясь от перцептрона правильной реакции. Таким же методом вырабатывается правильная реакция перцептрона и в

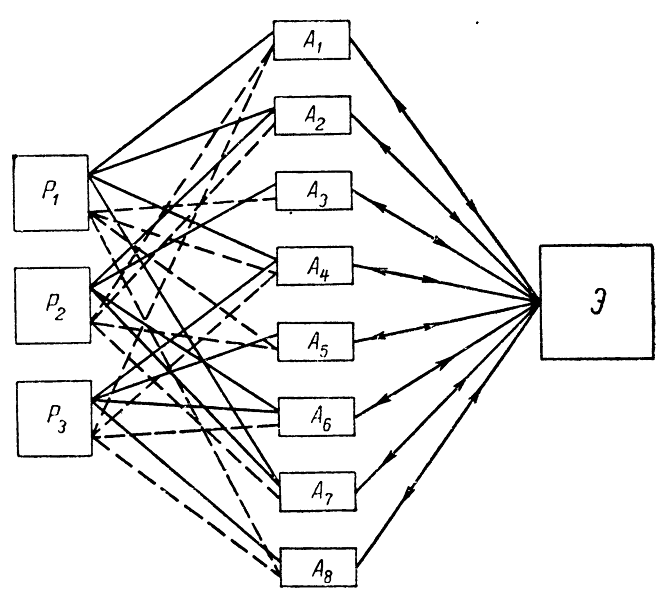


Рис. 18. Схема, поясняющая принцип действия перцептрона
P — рецепторные (чувствительные) ячейки; *A* — ассоциирующие ячейки; *Э* — эффекторная ячейка.

противоположном случае, когда подлежащий опознанию предмет оказывается неопознанным. После некоторого периода обучения перцептрон в дальнейшем принимает правильные решения «самостоятельно».

Фактически в перцептроне «Марк-I» входное устройство представляет собой квадратную матрицу из миниатюрных фотоэлементов. Общее количество ассоциирующих ячеек равно 512. Каждая такая ячейка содержит пороговый детектор, в котором производится оценка величины суммарного сигнала, поступающего от фоторецепторов. Если сигнал превышает пороговое значение, то ассоциирующая ячейка выдает сигнал той или иной

величины и знака. Этот сигнал снимается с потенциометра, движок которого приводится в движение электродвигателем, управляемым оператором в процессе «обучения» перцептрона.

Эффекторные ячейки перцептрона представляют собой пороговые элементы триггерного действия. Таким образом, перцептрон, предназначенный для опознавания

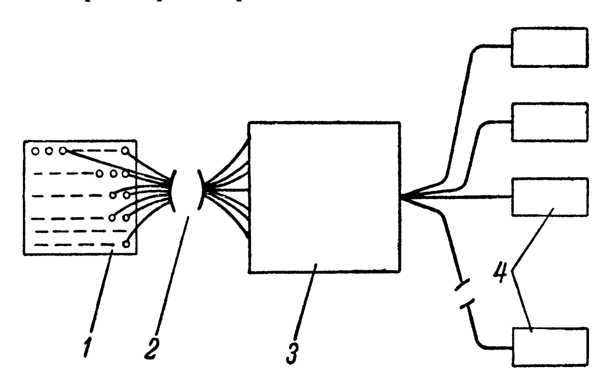


Рис. 19. Блок-схема перцептрона.
1 — поле рецепторов; 2 — случайные соединения; 3 — блок ассоциирующих ячеек; 4 — эффекторные ячейки.

32 букв алфавита, должен иметь 5 эффекторных ячеек, что позволяет, применяя двоичный код, описать $2^5=32$ объекта.

О сложности монтажной схемы устройства можно судить по следующим данным. От каждой из 400 рецепторных ячеек перцептрона «Марк-I» отходит 40 выходных проводников, подключаемых в случайном порядке к ассоциирующим ячейкам, каждая из которых имеет от 10 до 100 входов.

Блок-схема перцептрона в целом приведена на рис. 19.

Вопросам автоматического опознавания визуальных, акустических и радиолокационных объектов в настоящее время посвящается все большее количество теоретических и экспериментальных разработок. Это дает основание надеяться, что уже в ближайшее время перцептроны смогут найти достаточно широкое практическое применение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая брошюра представляет собой попытку популярного изложения основных идей бионики как нового раздела кибернетики. Эти идеи, как и бионический подход к созданию кибернетических устройств, являются, вероятно, одним из наиболее перспективных путей преодоления таких недостатков современных электронных машин, как негибкость их поведения в незапрограммированных заранее ситуациях, неспособность к анализу явлений внешней среды, узость и односторонность каналов ввода информации, низкая экономичность и надежность.

Стремление почерпнуть идеи для дальнейшего развития кибернетической техники из органического мира объясняется исключительно высоким совершенством биологических организмов, обусловленным миллиардами лет эволюционного развития и естественного отбора. На последнем, новейшем этапе этого процесса появился человек, представляющий собой вершину земного развития живой природы.

Великий ученый И. П. Павлов в своей статье «Ответ физиолога психологам» писал: «Человек есть, конечно, система (грубее говоря — машина), как и всякая другая в природе, подчиняющаяся неизбежным и единым для всей природы законам; но система, в горизонте нашего современного научного видения, единственная по высочайшему саморегулированию». Последняя часть этого высказывания показывает, что И. П. Павлов не исключает возможности по мере расширения горизонтов науки создавать системы, все более приближающиеся по своему совершенству к живым организмам и, наконец, к человеку.

Движение к созданию все более совершенных кибернетических машин и систем может происходить по двум путям. Один путь, по которому в основном развивалась до последнего времени кибернетическая техника, — это путь логического синтеза устройств, соответствующих разрабатываемым человеком техническим условиям и требованиям науки и техники. Эти разработки осуществлялись инженерами и математиками без использования в качестве образца механизмов управления живых организмов. Правда, создавая программу решения задачи

вычислительной машиной, математик часто следует логике решения этой задачи человеком, но вследствие совершенно иной по сравнению с мозгом внутренней организации машины для нее приходится зачастую разрабатывать своеобразные искусственные пути решения.

На описанном пути конструирования кибернетической техники встречается ряд технических трудностей, которые можно, конечно, стремиться преодолеть и без оглядки на живые кибернетические системы. Однако, создавая те или иные новые системы, всегда полезно предварительно проверить, не существуют ли уже другие системы, которые могут быть использованы как прообразы для конструирования новых систем. Именно таким весьма совершенным прообразом для технических кибернетических систем и являются управляющие системы органического мира.

Конечно, здесь отнюдь не все может удовлетворять запросам техники и заслуживает слепого заимствования. Несомненно, однако, что многие из механизмов переработки информации в органах центральной нервной системы человека заслуживают перенесения в кибернетические машины.

Для практической реализации такого пути создания новой техники необходимо, чтобы инженеры и математики, занимающиеся кибернетикой, овладели основами физиологии высшей нервной деятельности. При этом следует учитывать, что важнейшие физиологические механизмы памяти и мышления до сих пор еще не раскрыты наукой. Дальнейших успехов в этой области можно добиться только совместными усилиями физиологов, математиков и инженеров, ибо раскрытие этих механизмов требует не только наблюдения качественных сторон соответствующих процессов, но и тончайшего эксперимента с применением сложнейшей электронной аппаратуры и, наконец, кропотливой математической обработки результатов эксперимента.

Именно на этом пути следует ожидать новых выдающихся открытий в физиологии высшей нервной деятельности животных и человека и новых достижений в применении этих открытий для создания кибернетических машин.

ЛИТЕРАТУРА

А. Популярная

Воронцов Д. С., Электричество в живом организме, Изд. «Знание», 1961.

Гаазе-Рапопорт М. Г., Автоматы и живые организмы, Физматгиз, 1961.

Гриффин Д., Эхо в жизни людей и животных, Физматгиз, 1961.

Гуртовой Г. К., Глаз и зрение, Изд. АН СССР, 1959.

Гутенмахер Л. И., Электронные информационно-логические машины, Изд. АН СССР, 1960.

Демирчоглян Г. Г., Физиология анализаторов, Учпедгиз, 1956.

Крайзмер Л. П., Техническая кибернетика, Госэнергоиздат, 1958.

Крайзмер Л. П., Новые элементы электронных цифровых машин, Госэнергоиздат, 1961.

Макаров П. О., Биофизика возбудимости органов чувств, Изд. Ленинградского общества по распространению политических и научных знаний, 1961.

Полетаев И. А., Сигнал, Изд. «Советское радио», 1958.

Б. Для подготовленных читателей

Автоматы, Сборник статей под ред. К. Э. Шеннона и Дж. Маккарти, Изд. иностранной литературы, 1956.

Брайнес С. Н., Напалков А. В., Свечинский В. Б., Нейрокибернетика, Медгиз, 1962.

Брейзье М., Электрическая активность нервной системы, Изд. иностранной литературы, 1955.

Глезер В. Д., Цуккерман И. И., Информация и зрение, Изд. АН СССР, 1961.

Кибернетический сборник I, Сборник переводов под ред. А. А. Ляпунова и О. Б. Лупанова, Изд. иностранной литературы, 1960.

Китов А. И., Криницкий Н. А., Электронные цифровые машины и программирование, Физматгиз, 1959.

Крайзмер Л. П., Устройства хранения дискретной информации, Госэнергоиздат, 1961.

Ричардс Р. К., Элементы и схемы цифровых вычислительных машин, Изд. иностранной литературы, 1961.

Современные проблемы биофизики, Сборник переводов под ред. Г. М. Франка и А. Г. Пасынского, Изд. иностранной литературы, 1961.

Фельдбаум А. А., Вычислительные устройства в автоматических системах, Физматгиз, 1959.

Физика и химия жизни, Сборник статей, Изд. иностранной литературы, 1960.

Харкевич А. А., Опознание образов, «Радиотехника», 1959, № 5.

Цена 16 коп.